

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2018.09.004

垃圾焚烧炉渣中可溶盐对水泥稳定材料性能的影响

刘 栋¹, 尚小亮², 杨西海²

(1. 江西省交通科学研究所, 江西 南昌 330200; 2. 江西省高速公路投资集团有限责任公司, 江西 南昌 330025)

摘要:为将生活垃圾焚烧炉渣用于水泥稳定材料的道路基层,分析了生活垃圾焚烧炉渣中氯盐和硫酸盐的含量,通过无侧限抗压强度试验和劈裂强度试验分析了氯盐和硫酸盐对水泥稳定炉渣碎石混合料强度的影响,通过干缩试验和温缩试验分析了氯盐和硫酸盐对混合料变形性能的影响,并采用微观测试方法分析了氯盐和硫酸盐对混合料的微观作用机理。结果表明:试验垃圾焚烧炉渣中可溶氯盐和硫酸盐含量平均值分别为0.57%,1.01%;对掺30%左右垃圾焚烧炉渣的混合料,当垃圾焚烧炉渣中氯盐、硫酸盐含量分别达到1.67%,2.00%后,混合料的强度明显降低,氯盐、硫酸盐含量分别超过0.67%,1.00%后混合料的干缩变形和温缩变形均明显增大;水洗处理可降低垃圾焚烧炉渣中可溶盐含量,掺水洗垃圾焚烧炉渣的混合料的强度没有明显变化,短期干缩变形有所增大,温缩变形降低;微观分析表明,Cl⁻与水泥水化产物发生化学反应生成Friedel盐,掺氯盐、硫酸盐的混合料内部水化产物增多,但当掺Na₂SO₄含量达到1.0%时,部分水泥颗粒未水化。为保证水泥稳定炉渣碎石混合料的性能,应限定垃圾焚烧炉渣中可溶盐的含量。

关键词:道路工程;可溶盐;性能试验;垃圾焚烧炉渣;机理

中图分类号:U414.1

文献标识码:A

文章编号:1002-0268(2018)09-0021-06

Influence of Soluble Salt in Waste Incineration Bottom Ash on Performance of Cement Stabilized Material

LIU Dong¹, SHANG Xiao-liang², YANG Xi-hai²

(1. Jiangxi Transportation Institute, Nanchang Jiangxi 330200, China;

2. Jiangxi Provincial Expressway Investment Group Co., Ltd., Nanchang Jiangxi 330025, China)

Abstract: In order to utilize municipal solid waste incineration bottom ash (IBA) in cement stabilized materials for road base, the contents of soluble salts including chloride salt and sulfate salt in the IBA are tested. The effects of soluble salts on the strength of cement stabilized IBA and crushed stone mixture are analyzed by applying unconfined compressive strength test and splitting strength test. The effects of soluble salts on the deformation property of the mixture are analyzed by applying dry shrink test and temperature shrink test. Besides, the microscopic mechanism of chloride and sulfate salts on the mixture is analyzed by micro test method. The result shows that (1) The average contents of chloride and sulfate salts in the tested IBA are 0.57% and 1.01% respectively. (2) For the mixture contained 30% IBA, the mixture's strength is significantly decreased when the content of chloride and sulfate salts in IBA is more than 1.67% and 2.00% respectively, and the mixture's dry shrinkage deformation and temperature shrinkage deformation are significantly increased when the content of chloride and sulfate salts is more than 0.67% and 1.00%

收稿日期: 2017-06-18

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2017H0009, 2015C0023); 江西省科技平台建设项目(20171BCD40017)

作者简介: 刘栋(1987-), 男, 山东淄博人, 工学博士. (zbyikun@163.com)

respectively. (3) Water treatment can reduce the soluble salts content in IBA, the strength property of the mixture contained IBA with water treatment shows no significant difference compared with control mixture, while the short shrinkage deformation increases and the temperature shrinkage deformation decreases. Microscopic analysis shows that Cl^- reacts with cement hydration products to produce Friedel salts, and hydration products increased in the mixture with addition of chloride and sulfate salts. However, some cement particles are not hydrated when the Na_2SO_4 content is 1.0%. In order to ensure the performance of the mixture, the content of soluble salts in IBA should be limited.

Key words: road engineering; soluble salt; performance test; waste incineration bottom ash; mechanism

0 引言

焚烧是目前国内外处理城市生活垃圾的主要技术方法之一, 焚烧后仍存在垃圾焚烧炉渣和飞灰这两种主要固体废弃物^[1]。其中, 垃圾焚烧炉渣中污染物含量低, 可进行资源化利用^[2-3]。在道路工程中, 可替代碎石与沥青或无机结合料混合后制备沥青混合料^[4]或无机结合料稳定材料^[5]。但垃圾焚烧炉渣化学成分复杂, 含有金属氧化物、氢氧化物和碳酸盐、硫酸盐等, 可溶盐类以氯盐和硫酸盐为主^[6]。例如, PVC 类塑料、泡沫及厨余垃圾等焚烧后仍有部分氯元素聚集到垃圾焚烧炉渣中^[7], 硫酸盐则来自垃圾中原有硫酸盐或含硫化合物。生活垃圾来源、构成不同, 垃圾焚烧炉渣中可溶盐的含量也有所不同^[8]。Vegas 等^[9]测试得到垃圾焚烧炉渣中可溶盐总量范围为 1.61% ~ 1.89%、硫酸盐含量为 0.97% ~ 1.07%, 孙路石等^[10]则得到氯盐含量为 2.80%, 硫酸盐含量为 5.97%。

原材料中可溶盐可能会影响水泥水化进程, 并增加水泥基材料中孔隙水的腐蚀性, 造成材料的强度和耐久性问题^[11-12]。包龙生^[13]研究表明海排灰中氯盐含量超过 0.5% 的部分不能被水泥固化, 游离的氯离子抑制水泥水化和火山灰反应, 含量过大时对水泥稳定碎石混合料的性能不利。马冬梅^[14]研究了可溶盐对水泥土性能的影响, 发现当软土中硫酸盐含量高时, 大量钙矾石晶体的生成会使水泥土膨胀而变得疏松, 损坏水泥土的长期性能。因此, 应限定水泥稳定材料中的可溶盐, 如《公路路面基层施工技术细则》^[15] (JTG/T F20—2015) 限定水泥稳定材料用细集料中硫酸盐含量 $\leq 0.25\%$ 。为降低垃圾焚烧炉渣中的可溶盐, 部分学者^[16-17]研究了相关处理措施, 如水洗、化学试剂处理等。Kim 等^[17]研究发现水洗能移除垃圾焚烧炉渣中 77% 的氯盐, 而增加液固比例和水洗时间对进一步降低氯盐含量则无利。

本研究为将垃圾焚烧炉渣用于水泥稳定材料基层, 开展其可溶盐含量测试, 配制掺垃圾焚烧炉渣

的水泥稳定材料 (称为水泥稳定炉渣碎石), 进行不同可溶盐含量混合料的性能试验研究, 并采用微观测试方法分析可溶盐对混合料的微观作用机理, 从而为垃圾焚烧炉渣的资源化利用提供参考。

1 试验材料

1.1 原材料

试验共 7 组垃圾焚烧炉渣试样, 分别取自上海、杭州两地的生活垃圾焚烧厂, 焚烧工艺及预处理方法相似。筛分试验结果表明, 各组垃圾焚烧炉渣的粒径分布相近, 9.5, 4.75, 2.36 mm 和 0.075 mm 筛孔通过质量百分率的平均值分别为 92.2%, 77.3%, 59.0% 和 6.4%。

参考《森林土壤水溶性盐分分析》(LYT 1251—1999) 和《固体废物浸出毒性浸出方法水平振荡法》(HJ 557—2010), 以垃圾焚烧炉渣与蒸馏水质量比 1:5 制备浸出溶液, 分别采用硝酸银滴定法、硫酸钡质量法测定浸出溶液的氯离子 (Cl^-)、硫酸根 (SO_4^{2-}) 含量, 试验结果见表 1。表中结果表明, 垃圾焚烧炉渣中 SO_4^{2-} 含量超过了 JTG/T F20 中对细集料的规定 ($\leq 0.25\%$), 如按照天然碎石要求将限制垃圾焚烧炉渣的应用, 因此有必要探讨在超标条件下可溶盐对水泥稳定材料的影响。另外, 将垃圾焚烧炉渣采用蒸馏水进行冲洗, 原样垃圾焚烧炉渣中 Cl^- , SO_4^{2-} 含量分别为 0.67%, 1.00%, 水洗后其含量均下降, 分别为 0.10%, 0.87%, 其中 Cl^- 的降低幅度较大, SO_4^{2-} 的降低幅度较小, 这可能是因为部分硫酸盐的溶解度较低。

表 1 Cl^- 和 SO_4^{2-} 含量试验结果

Tab. 1 Test result of Cl^- and SO_4^{2-} contents

试验指标	平均值	最大值	最小值	变异系数/%
$\text{Cl}^- / \%$	0.57	0.96	0.34	36.70
$\text{SO}_4^{2-} / \%$	1.01	1.10	0.93	8.70

水泥采用江苏某品牌 32.5 级复合硅酸盐水泥。

1.2 混合料配合比设计

选取一组垃圾焚烧炉渣, 参照 JTG/T F20 中方法替代石灰岩集料制备水泥稳定炉渣碎石混合料, 替代质量百分率为 28%, 混合料的设计配合比见表 2, 设计级配见表 3。

表 2 混合料质量配合比

Tab. 2 Mixing ratio of mixture mass

原材料种类	不同粒径范围的石灰岩集料		垃圾焚烧炉渣	水泥
	4.75 ~ 16 mm	16 ~ 31.5 mm		
配合比/%	22	50	28	4.5

表 3 混合料设计级配

Tab. 3 Mixture design gradation

级配	通过下列筛孔 (mm) 的质量百分率/%						
	31.5	19	9.5	4.75	2.36	0.6	0.075
设计级配	100	81.4	43.2	27.2	21.4	11.9	2.9
设计级配上限	100	86.0	58.0	32.0	28.0	15.0	3.0
设计级配下限	100	68.0	38.0	22.0	16.0	8.0	0

混合料成型时, 称取一定质量 NaCl 或 Na₂SO₄ (纯度 > 99.99%), 加入拌和水中, 均匀搅拌后加入混合料进行拌和, 然后成型试件。NaCl 或 Na₂SO₄ 掺量分别为 0.50%, 1.00% (占垃圾焚烧炉渣质量的百分比)。各组试验混合料中的实际可溶盐含量见表 4。同时, 采用水洗处理垃圾焚烧炉渣替代天然集料制备混合料 (代号“水洗”)。垃圾焚烧炉渣中已有一定量的 Cl⁻, SO₄²⁻, 即使水洗后仍存在一定量的可溶盐, 因此本研究混合料的试验结果实际是氯盐和硫酸盐综合影响下的结果。

表 4 试验混合料中可溶盐含量

Tab. 4 Contents of soluble salts in testing mixture

混合料代号	参加可溶盐种类	可溶盐掺量/%	代表垃圾焚烧炉渣中可溶盐含量/%
水洗	—	0	氯盐 0.10, 硫酸盐 0.87
对照组	—	0	氯盐 0.67, 硫酸盐 1.00
氯盐 - 0.5	NaCl	0.50	氯盐 1.17, 硫酸盐 1.00
氯盐 - 1.0		1.00	氯盐 1.67, 硫酸盐 1.00
硫酸盐 - 0.5%	Na ₂ SO ₄	0.50	氯盐 0.67, 硫酸盐 1.50
硫酸盐 - 1.0%		1.00	氯盐 0.67, 硫酸盐 2.00

2 试验方法与方案

2.1 混合料性能试验方法

依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG E51—2009) 进行混合料性能试验。按照重型击实试验结果, 在 98% 压实度下分别静压成型圆柱

体试件和中梁试件。测试圆柱体试件标准养生 28 d 的无侧限抗压强度和劈裂强度。中梁试件标准养生 6 d 后浸水 24 h, 端面磨平后竖向放置于室内自然环境下风干, 在试件顶部安置千分表测试干缩应变。温缩试验中, 中梁试件标准养生 28 d, 在温度控制箱内测试试件从 50 °C 降至 0 °C 时的竖向温缩应变。

2.2 微观试验方法

采用北京某公司 XD - 6 型 X 射线衍射仪 (XRD) 分析混合料中结合料的矿物成分, 扫描角度范围为 5° ~ 75°, 扫描步长为 0.02°。采用日本日立 S - 2360N 扫描电子显微镜 (SEM) 观察混合料中颗粒表面的微观形貌, 工作电压为 25 kV, 分辨率为 3 nm。

3 试验结果及分析

3.1 可溶盐对混合料强度特性的影响

无侧限抗压强度试验结果见图 1。由图 1 可见, 氯盐 - 0.5%、硫酸盐 - 0.5% 试件的无侧限抗压强度均明显高于对照组, 氯盐 - 1.0%、硫酸盐 - 1.0%、水洗试件则与对照组相近。劈裂强度试验结果见图 2。由图 2 可见, 氯盐 - 1.0%、硫酸盐 - 0.5% 试件的劈裂强度较对照组提高, 而其余试件的劈裂强度与对照组相近。

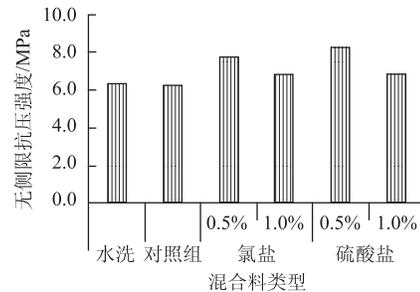


图 1 无侧限抗压强度试验结果

Fig. 1 Result of unconfined compressive strength test

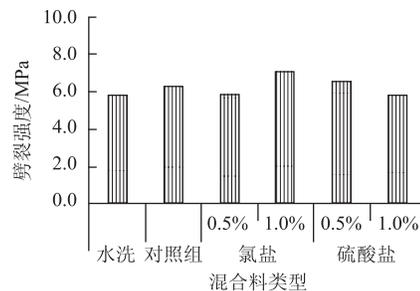


图 2 劈裂强度试验结果

Fig. 2 Result of splitting strength test

可见, 可溶盐种类、掺量对混合料无侧限抗压强度、劈裂强度的影响程度不尽相同。总体来看,

掺 0.5% NaCl 或 Na_2SO_4 明显提高了混合料强度；而掺 NaCl, Na_2SO_4 含量分别达到 1.0% 时对混合料强度形成不利, 根据垃圾焚烧炉渣中可溶盐含量及在混合料中的掺量换算为垃圾焚烧炉渣中可溶盐含量, 分别为氯盐 1.67%, 硫酸盐 1.00%, 氯盐 0.67%, 硫酸盐 2.00%; 水洗混合料的无侧限抗压强度、劈裂强度与对照组没有明显差异, 这可能是因为水洗并不能完全除去可溶盐, 尤其是硫酸盐含量仍较高。因此, 为保证混合料的强度, 应限定垃圾焚烧炉渣中氯盐、硫酸盐的最高含量。

3.2 可溶盐对混合料变形特性的影响

干缩试验结果见图 3。由图 3 可见, 掺氯盐、硫酸盐试件的干缩应变均大于对照组, 其中掺硫酸盐试件的干缩应变大于掺氯盐试件, 水洗试件的前期干缩应变大于对照组, 而 30 d 干缩应变则与对照组基本相当。

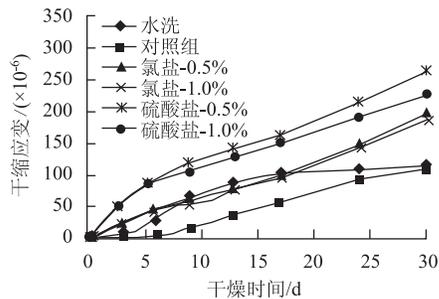


图 3 干缩试验结果

Fig. 3 Result of dry shrinkage test

温缩试验结果见图 4。由图 4 可见, 50 ~ 20 °C 内, 掺氯盐、硫酸盐试件的温缩应变明显大于对照组, ≤ 20 °C 内则与对照组没有明显差异, 这与高温时试件膨胀变形较大有关; 水洗试件在每个试验温度区间内的温缩应变与对照组没有明显差异。依据图 4, 计算各混合料 50 ~ -5 °C 内的累积温缩应变, 见图 5。由图 5 可见, 各组混合料累积温缩应变大小排序为: 硫酸盐 - 1.0% > 氯盐 - 0.5% > 氯盐 - 1.0% > 硫酸盐 - 0.5% > 对照组 > 水洗。

干缩应变较大表明水泥稳定材料基层在养生期间可能产生较大的内应力; 温缩应变较大表明基层可能对温度变化较敏感, 在剧烈降温时产生较大内应力, 在温度交替循环作用下则产生因胀缩变形而累积的内部损伤。试验结果表明, 掺氯盐、硫酸盐, 即垃圾焚烧炉渣中氯盐、硫酸盐含量分别超过 0.67%, 1.00%, 混合料的干缩变形和温缩变形均增大, 这表明过高含量的可溶盐将增加基层收缩开裂的可能性。另外, 水洗处理将减少混合料的温缩

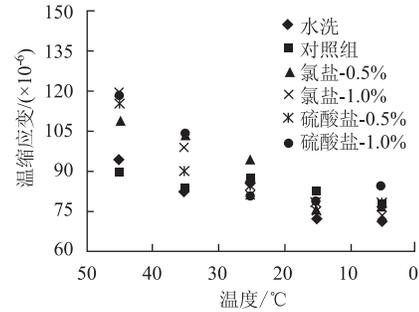


图 4 温缩试验结果

Fig. 4 Result of temperature shrink test

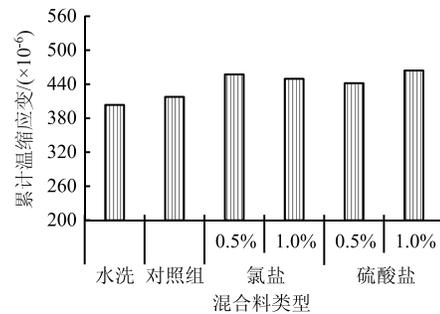


图 5 累计温缩应变

Fig. 5 Accumulative temperature shrink strain

变形, 这对降低运营期基层温缩开裂有利, 而对减少干燥开裂作用较小。

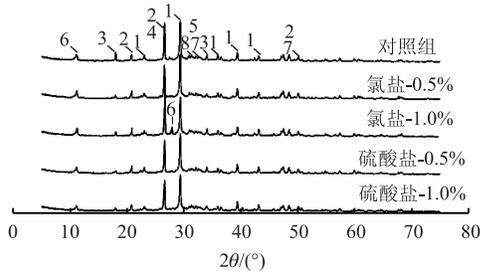
4 微观机理分析

4.1 XRD 分析

养生 28 d 混合料中结合料的 XRD 图谱见图 6。由图 6 可见, 与对照组相比, 掺氯盐、硫酸盐混合料的 XRD 图谱中衍射角 $2\theta = 18.0^\circ$ 附近的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度存在明显减弱趋势, 即 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 减少; 氯盐 - 1.0% 的 XRD 图谱中可识别出 $2\theta = 27.9^\circ$ 附近处的 Friedel 盐 ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{O}_6\text{Cl}_2 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$); 其余混合料中反应生成水化产物在 XRD 图谱中并不能明显显示出来, 可能是因为量较少或结晶度较低。可见, Cl^- , SO_4^{2-} 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 等水泥水化产物发生反应生成 Friedel 盐晶体及其他结晶度较低的水化产物。

4.2 SEM 分析

图 7 ~ 图 11 分别给出了养生 28 d 各组混合料颗粒表面的 SEM 图。对比图 8, 图 9 与图 7 可见, 掺氯盐混合料中针状、棒状晶体较对照组有增多、增粗的趋势, 而六边形片状 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体数量存在减少的趋势, 且氯盐 - 1.0% 混合料中晶体数量和体积较氯盐 - 0.5% 混合料又增多、增大。这表明, Cl^- 与水泥水化产物尤其是 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 之间发生了反

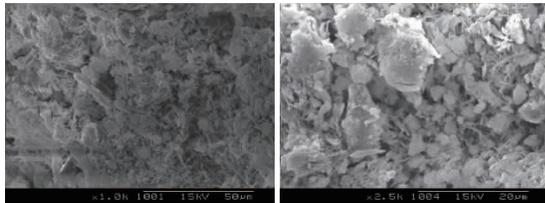


1 - CaCO₃; 2 - SiO₂; 3 - Ca (OH)₂; 4 - 斜方钙沸石;
5 - C₂S; 6 - Friedel 盐; 7 - C-S-H; 8 - C₃S

图 6 XRD 图谱

Fig. 6 XRD patterns

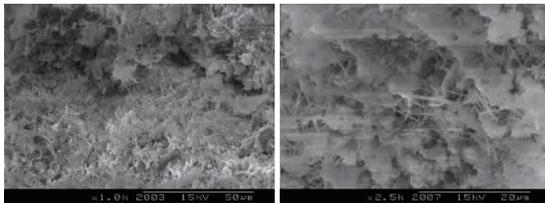
应, 并生成了更多水化产物, 这与 XRD 分析结论一致。



(a) 放大1 000倍 (b) 放大2 500倍

图 7 对照组的 SEM 图

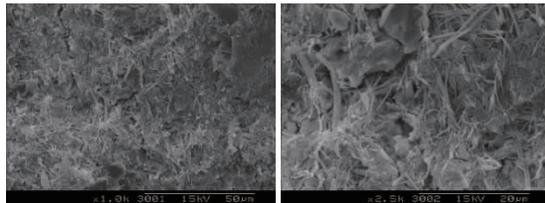
Fig. 7 SEM photos of control group



(a) 放大1 000倍 (b) 放大2 500倍

图 8 氯盐 -0.5% 的 SEM 图

Fig. 8 SEM photos of NaCl -0.5% mixture



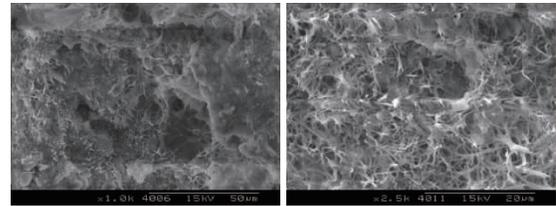
(a) 放大1 000倍 (b) 放大2 500倍

图 9 氯盐 -1.0% 的 SEM 图

Fig. 9 SEM photos of NaCl -1.0% mixture

由图 10、图 11 可见, 与对照组及掺氯盐混合料相比, 硫酸盐 -0.5% 混合料中存在更多尺寸更大的针状钙矾石晶体。而对于硫酸盐 -1.0% 混合料, 放大 1 000 倍 SEM 照片显示集料颗粒表面存在细小未

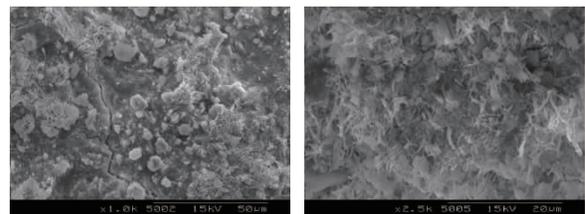
水化的水泥颗粒, 水泥颗粒的表面被针状、絮状凝胶物质包裹; 放大 2 500 倍 SEM 照片显示凝胶物质数量明显少于对照组与掺氯盐混合料。



(a) 放大1 000倍 (b) 放大2 500倍

图 10 硫酸盐 -0.5% 的 SEM 图

Fig. 10 SEM photos of Na₂SO₄ -0.5% mixture



(a) 放大1 000倍 (b) 放大2 500倍

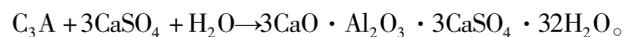
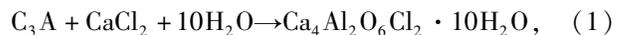
图 11 硫酸盐 -1.0% 的 SEM 图

Fig. 11 SEM photos of Na₂SO₄ -1.0% mixture

另外, 图 9 (a) 和图 11 (a), 即氯盐、硫酸盐含量分别为 1.0% 的较小放大倍数的 SEM 图, 显示混合料颗粒表面存在裂缝, 这可能是因为氯盐、硫酸盐含量较高时, 混合料内部生成的胶凝物质较少, 不足以覆盖或填充颗粒表面的裂缝。

4.3 机理分析

NaCl, Na₂SO₄ 均是水泥基材料的无机盐类早强剂。NaCl 溶于水后电离为离子, Cl⁻ 吸附于硅酸三钙 (C₃S)、硅酸二钙 (C₂S) 的表面, 可增加水泥颗粒的分散度, 加速水泥水化^[18]。NaCl 与水泥水化产物 Ca (OH)₂ 反应生成 CaCl₂, CaCl₂ 与 C₃A 反应生成一定量的 Friedel 盐, 见式 (1)。同时, CaCl₂ 能促进铝酸三钙 (C₃A) 与垃圾焚烧炉渣中原有的 CaSO₄ 反应生成钙矾石, 见式 (2)。Na₂SO₄ 遇水溶解, 与 Ca (OH)₂ 反应生成 CaSO₄ 和 NaOH, 且 CaSO₄ 颗粒细度很小, 与 C₃A 反应生成钙矾石的速度将加快, 见式 (2)。同时, NaOH 能提高 C₃A 和 CaSO₄ 的溶解度, 进一步促进钙矾石形成。



综上, 垃圾焚烧炉渣中适量氯盐、硫酸盐将加

速 C_3S , C_2S 等水泥熟料水化以及水化产物的凝结硬化, 水泥浆体中固相将增多, 水泥石更加密实, 这对混合料早期强度形成有利。但 Cl^- 含量过高将被水化产物固化并反应生成 Friedel 盐, 这将减少混合料中的凝胶物质; SO_4^{2-} 含量过高时, 钙矾石凝胶将覆盖在未水化水泥颗粒表面, 阻碍水分子及离子扩散, 延缓水泥水化。因此, 过高含量的氯盐、硫酸盐都对混合料强度形成及发展不利。

另外, 混合料中晶体和凝胶物质增多, 水泥石致密性增加, 水泥石失水产生的收缩应力和应变也随之增大, 降温过程中水泥石的收缩应力也增大, 试件干缩应变和温缩应变增大。

水洗垃圾焚烧炉渣对水泥水化及混合料强度、变形特性的影响较常规垃圾焚烧炉渣降低。但水洗处理后试件的短期干缩应变仍大于对照组, 这是因为水洗处理仅除去部分 Cl^- , 而 SO_4^{2-} 含量降低量小, 可溶盐对水泥水化的影响仍存在; 而温缩应变则较对照组有所降低, 这是因为水洗处理也将部分细粒径垃圾焚烧炉渣除去。

5 结论

(1) 采用浸出法测试了 7 组垃圾焚烧炉渣中 Cl^- , SO_4^{2-} 含量, 平均值分别为 0.57%, 1.01%。

(2) 设计了掺 30% 左右垃圾焚烧炉渣的水泥稳定碎石混合料, 当垃圾焚烧炉渣中氯盐超过 1.67% 或硫酸盐超过 2.00% 时对混合料的无侧限抗压强度和劈裂强度不利, 而氯盐、硫酸盐含量分别超过 0.67%, 1.00%, 混合料的干缩变形和温缩变形均增大。因此, 为保证水泥稳定基层强度及降低基层收缩开裂的可能性, 应限定垃圾焚烧炉渣中可溶盐的含量。

(3) 水洗处理可降低垃圾焚烧炉渣中的可溶盐含量, 相比于常规垃圾焚烧炉渣, 水洗处理后水泥稳定材料的强度没有明显变化, 短期干缩变形有所增大, 但温缩变形有所降低。

(4) 垃圾焚烧炉渣中 Cl^- 与水泥水化产物反应生成 Friedel 盐, 掺氯盐、硫酸盐的混合料内部水化产物增多, 但当掺 Na_2SO_4 含量达到 1.0% 时, 部分水泥颗粒被钙矾石凝胶覆盖, 阻碍水化反应。

(5) 可溶盐对水泥稳定炉渣碎石性能的影响体现在短期和长期, 本研究仅对短期性能做了分析, 对长期性能尚需进一步研究。另外, 垃圾焚烧炉渣中的可溶盐含量超过道路相关规范的要求, 因此将其用于道路工程时应谨慎。

参考文献:

References:

- [1] ZHANG D Q, TAN S K, GERSBERG R M. Municipal Solid Waste Management in China: Status, Problems and Challenges [J]. Journal of Environmental Management, 2010, 91 (8): 1623 - 1633.
- [2] 何晶晶, 宋立群, 章骅, 等. 垃圾焚烧炉渣的性质及其利用前景 [J]. 中国环境科学, 2003, 23 (4): 395 - 398.
HE Pin-jing, SONG Li-qun, ZHANG Hua, et al. Characterization of Waste Incineration Bottom Ash and Its Beneficial Use Prospect [J]. China Environmental Science, 2003, 23 (4): 395 - 398.
- [3] 耿翠洁, 陈德珍, 施惠生. 道路建设中废料再生利用的综合环境效益评估指标体系 [J]. 公路交通科技, 2012, 29 (10): 142 - 148, 153.
GENG Cui-jie, CHEN De-zhen, SHI Hui-sheng. Evaluation Index System for Assessing Environmental Impacts Associated with Road Construction with Recycled Waste Materials [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2012, 29 (10): 142 - 148, 153.
- [4] 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 - 311.
LIU DONG, LI Li-han, CUI Hua-jie. 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 - 311.
- [5] 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 - 409.
LIU DONG, LI Li-han, CUI Hua-jie. Pavement Performance of Cement Stabilized Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Aggregate and Crushed Stones [J]. Journal of Tongji University: Natural Science Edition, 2015, 43 (3): 405 - 409.
- [6] 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 - 299.
- [7] 李晓东, 杨忠灿, 陆胜勇, 等. 城市生活垃圾氯含量测定方法的研究 [J]. 燃料化学学报, 2002, 30 (6): 563 - 568.
LI Xiao-dong, YANG Zhong-can, LU Sheng-yong, et al. Study on Determination Methods for Chlorine Content in Municipal Solid Waste (MSW) [J]. Journal of Chemistry and Technology, 2002, 30 (6): 563 - 568.

(下转第 40 页)

- Nanjing: Southeast University, 2004.
- [13] 倪富健, 屠伟新, 黄卫. 基于神经网络技术的路面性能预估模型 [J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2000, 30 (5): 91-95.
NI Fu-jian, TU Wei-xin, HUANG Wei. Pavement Performance Forecasting Model Based on Neural Network [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2000, 30 (5): 91-95.
- [14] 樊旭英, 高凤春, 王海龙, 等. 基于改进 EW-AHP 的沥青路面预防性养护评价模型 [J]. 公路交通科技, 2017, 34 (9): 8-13.
FAN Xu-ying, GAO Feng-chun, WANG Hai-long, et al. A Model for Asphalt Pavement Preventive Maintenance Evaluation Based on Improved EW-AHP [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2017, 34 (9): 8-13.
- [15] 林俊涛, 吴少鹏, 刘全涛, 等. 沥青路面功能性预养护材料的养护时机研究 [J]. 中国公路学报, 2014, 27 (9): 19-23.
LIN Jun-tao, WU Shao-peng, LIU Quan-tao, et al. Research on Maintenance Time for Functional Preventive Materials in Asphalt Pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27 (9): 19-23.
- [16] 王朝辉, 王丽君, 白军华, 等. 基于时段的沥青路面预防性养护时机与对策一体优化研究 [J]. 中国公路学报, 2010, 23 (5): 27-34.
WANG Chao-hui, WANG Li-jun, BAI Jun-hua, et al. Research on Integration Optimization of Asphalt Pavement Preventive Maintenance Timing and Countermeasures during Period [J]. China Journal of Highway and Transport, 2010, 23 (5): 27-34.
- [17] 程珊珊, 潘玉利. 专家系统在路面养护管理中的应用研究及展望 [J]. 公路交通科技, 2005, 22 (6): 57-60.
CHENG Shan-shan, PAN Yu-li. Application of Expert System in Pavement Maintenance Management-state of the Art and Future [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2005, 22 (6): 57-60.
- [18] 芮少权, 匡安乐. 高速公路月底交通量 ARIMA 预测模型 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2010, 30 (4): 82-91.
RUI Shao-quan, KUANG An-le. ARIMA Model of Expressway Traffic Volume Monthly Forecasting [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2010, 30 (4): 82-91.
- (上接第26页)
- [8] ASTRUP T. Pretreatment and Utilization of Waste Incineration Bottom Ashes: Danish Experiences [J]. Waste Management, 2007, 27 (10): 1452-1457.
- [9] VEGAS I, IBÁÑEZ J A, JOSÉ J T S, et al. Construction Demolition Wastes, Waelz Slag and MSWI Bottom Ash: A Comparative Technical Analysis as Material for Road Construction [J]. Waste Management, 2008, 28 (3): 565-574.
- [10] 孙路石, 李敏, 向军, 等. 城市生活垃圾焚烧灰渣的特征 [J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009 (8): 77-79.
SUN Lu-shi, LI Min, XIANG Jun, et al. Characteristics of the Ash Deposits from Incinerated Municipal Solid Waste [J]. Journal of Huazhong University of Science & Technology: Natural Science Edition, 2009 (8): 77-79.
- [11] 季辉, 杨全兵. 含盐环境中混凝土的破坏研究 [J]. 公路交通科技, 2011, 28 (11): 39-42.
JI Hui, YANG Quan-bing. Deterioration of Concrete Exposed to Salt Environment [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2011, 28 (11): 39-42.
- [12] 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): 1509-1520.
- [13] 包龙生. 海排灰在道路基层及底基层中的应用研究 [D]. 西安: 长安大学, 2008.
BAO Long-sheng. Study of Fly-ash-flushed-by-seawater Used in Road Base and Subbase Courses [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [14] 马冬梅. 可溶盐对水泥土强度影响的微观分析 [J]. 公路交通科技, 2008, 25 (4): 16-21.
MA Dong-mei. Microstructural Analysis of Influence of Soluble Ions on Strength of Cemented Soil [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25 (4): 16-21.
- [15] JTG/T F20—2015, 公路路面基层施工技术细则 [S]. JTG/T F20—2015, Technical Guidelines for Construction of Highway Roadbases [S].
- [16] JELENA T. Pre-treatment of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash for Utilisation in Road Construction [D]. Luleå: Luleå University of Technology, 2006.
- [17] KIM S Y, MATSUTO T, TANAKA N. Evaluation of Pre-treatment Methods for Landfill Disposal of Residues from Municipal Solid Waste Incineration [J]. Waste Management & Research, 2003, 21 (5): 416-423.
- [18] 申爱琴. 水泥与水泥混凝土 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
SHEN Ai-qin. Cement and Cement Concrete [M]. Beijing: China Communications Press, 2000.