

杨昱, 杨玉飞, 黄启飞, 等. 2009 碳酸化对模拟废物水泥窑共处置产品中重金属浸出的影响 [J]. 环境科学学报, 29(12): 2532–2537

Yang Y, Yang Y F, Huang Q F, *et al*. 2009. Influence of carbonation on the leaching characteristics of heavy metals in a co-processed cement product [J]. Acta Scientiae Circumstantiae 29(12): 2532–2537

碳酸化对模拟废物水泥窑共处置产品中重金属浸出的影响

杨昱¹, 杨玉飞^{1,2}, 黄启飞^{1,*}, 王琪¹, 杨子良¹

¹ 中国环境科学研究院, 北京 100012

² 浙江工业大学浙西分校, 衢州 324000

收稿日期: 2009-02-01 修回日期: 2009-05-12 录用日期: 2009-09-04

摘要: 通过模拟煅烧试验制取水泥熟料(重金属以一定的比例掺入水泥生料)并制备混凝土样品, 研磨至粒径小于 1mm, 并使部分样品发生碳酸化作用, 并分别对未碳酸化样品和碳酸化样品进行 pH 静态试验, 研究了碳酸化作用对混凝土样品酸中和容量以及重金属 (Cr Ni As Cd 和 Pb) 浸出行为的影响。结果表明, 未碳酸化样品在碱性范围内 (pH = 7~12) 酸中和容量较大, 而碳酸化样品则在弱酸性范围内 (pH = 5~7) 酸中和容量较大; 碳酸化作用不影响混凝土中 Cr Ni Cd Pb 的释放曲线的变化趋势, 仅改变了浸出量最小值出现的 pH 值区间, 但是碳酸化作用改变了混凝土中 As 的吸附相, 使其释放曲线发生了明显的改变; 碳酸化作用降低了混凝土中 Cr Ni Cd Pb 的浸出量, 但在较大 pH 范围内 (pH = 3~7 和 pH > 11), 增加了 As 的浸出量, 因此, 对混凝土中重金属溶出的安全性评价应重点关注 As

关键词: 水泥产品; 碳酸化; 重金属; 浸出特性; 水泥窑共处置

文章编号: 0253-2468(2009)12-2532-06 中图分类号: X705 文献标识码: A

Influence of carbonation on the leaching characteristics of heavy metals in a co-processed cement product

YANG Yu¹, YANG Yufei^{1,2}, HUANG Qifei^{1,*}, WANG Qi¹, YANG Ziliang¹

¹ Chinese Research Academy of Environmental Science Beijing 100012

² Zhejiang University of Technology Zhexi Branch Quzhou 324000

Received 1 February 2009; received in revised form 12 May 2009; accepted 4 September 2009

Abstract Cement clinker was produced from a cement calcination simulation facility (heavy metals were mixed into the cement raw meal in a certain proportion), and concrete samples were then prepared. The samples were milled to diameters less than 1 mm, some of which were carbonated and others were used as the control group. Tests of the pH-dependence were carried out to study the influence of carbonation on the leaching behavior of heavy metals (Cr Ni As Cd and Pb) and on the ANC (acid neutralizing capacity) of cement concrete. Under alkaline conditions (pH = 7~12) the ANC of the non-carbonated samples was larger; however in weak acid conditions (pH = 5~7) the ANC of the carbonated samples was larger. The leaching behavior of heavy metals including Cr Ni Cd and Pb was not influenced by carbonation, but the pH of the leaching liquid was changed. The adsorption phase of As was influenced by carbonation and the release rule changed obviously. The amounts of Cr Ni Cd and Pb leached from the concrete were reduced after carbonation, but at certain pH (pH = 3~7 and pH > 11), the amount of leached As increased. Consequently, the leaching behavior of As should be considered in risk assessment of concrete coproducts.

Keywords cement product; carbonation; heavy metal; leaching characteristic; cement kiln co-processing

1 引言 (Introduction)

废物水泥窑共处置因废物流的引入会增加水

泥产品中重金属等有害物质, 这类物质在水泥产品 (主要是混凝土) 的长期使用过程中可能会被逐渐释放而影响环境安全及人体健康 (Petkovic *et al*,

基金项目: 国家“十一五”科技支撑计划项目 (No. 2007BAC16B03, 2006BAC02A19)

Supported by the Projects in the National Science & Technology Pillar Program during the “Eleventh Five-year” Plan Period (No. 2007BAC16B03, 2006BAC02A19)

作者简介: 杨昱 (1983—), 女, E-mail yangyugir@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail huangq@cras.org.cn

Biography: YANG Yu (1983—), female, E-mail yangyugir@126.com; * **Corresponding author** E-mail huangq@cras.org.cn

2004). 因此, 对废物水泥窑共处置产品的环境安全性评价备受关注.

对水泥产品的安全性评价, 需根据实际应用场景选择并基于室内浸出实验建立释放模型, 在此基础上对重金属的长期累积释放量进行预测 (CEN, 2006). 通常, 模型的选择和建立都假设水泥产品处于雨水持续浸泡的条件并且重金属在浸出过程中不发生明显的化学变化. 在实际应用场景中, 水泥产品往往处于干湿交替的环境中而发生许多作用 (如, 碳酸化、氧化作用等), 这些作用会影响其中重金属的浸出行为和浸出量 (Sanchez *et al.*, 2002). 国内外学者重点研究了混凝土碳酸化的机理及其影响因素、混凝土碳酸化深度模型以及碳酸化作用对混凝土力学性能的影响 (白轲等, 2008 柳俊哲等, 2005 屈文俊等, 2007 余红发等, 2003 张海燕等, 2006 赵明辉, 2004). 碳酸化是影响水泥基材中物质浸出行为最普遍的化学作用 (Macias *et al.*, 1997). CO_2 溶于混凝土孔隙水并电离成 CO_3^{2-} 和 H^+ , 降低了孔隙水的 pH 值, 同时与 C—S—H (水化硅酸钙) 凝胶脱钙产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成 CaCO_3 沉淀, 使得 C—S—H 凝胶的 Ca/Si (钙硅比) 下降 (Sanchez *et al.*, 2002 Garrabrants *et al.*, 2004). 因此, 碳酸化作用对混凝土中重金属的浸出行为有较大影响. Garrabrants等 (2004) 对含有金属氧化物粉末的水泥固化块的研究结果表明, pH > 8.3 时, 碳酸化作用使得铅的溶解性降低, 而在 pH < 8 时则无影响; pH > 11 时, 由于碳酸化作用导致砷 (V) 的吸附相发生了溶解而使砷 (V) 的溶解性增加; 在 pH > 10 时, 因材料发生碳酸化后其中的铜生成碳酸铜沉淀而致使铜溶解性降低, 但碳酸化作用对镉和锌的溶解度几乎没有影响.

混凝土通常是以完整块状应用于实际场景中, 并且安全性评价所基于的模型建立也是以块状混凝土的浸出实验为基础, 因此, 采用块状混凝土样品更能反映真实应用场景中碳酸化的影响. 但考虑到在实验室内短期的碳酸化实验对块状混凝土的作用并不明显, 所以选择粉末状样品进行碳酸化实验, 强化混凝土的碳酸化作用, 更好地研究碳酸化作用对其中重金属浸出特性的影响. 因此, 本文通过向水泥生料中添加一定量的重金属化学试剂, 用电炉高温煅烧制取水泥熟料后制作混凝土块, 然后将其破碎、研磨, 并使样品发生碳酸化作用后进行 pH 静态试验. 同时, 以未发生碳酸化作用的混凝土

粉末作对照, 研究了碳酸化作用对混凝土粉末的酸中和容量及 Cr、Ni、As、Cd 和 Pb 5 种重金属的浸出行为的影响, 以期对混凝土中重金属的长期释放以及水泥产品实际应用场景安全性评价提供理论基础.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 水泥生料及重金属化学试剂

水泥生料取自北京水泥厂生料均化库, 由于工业生产线上进行共处置的危险废物种类多样、形态各异, 故采取添加重金属化合物的方法进行替代. 生料中各重金属含量、试验中掺烧的重金属种类、化学试剂及添加比例 (以单种重金属元素质量计) 见表 1. 重金属元素的化合价主要根据实际生产中废弃物所含重金属元素的化学形态而定, 除 As 外其它重金属均选用氧化物形式.

表 1 掺烧试验材料及设计

Table 1 Design and materials in the experiment			
重金属	化学试剂	生料重金属含量 /(mg kg ⁻¹)	添加比例
Cr	Cr ₂ O ₃	177.0	0.2%
Pb	PbO ₂	51.1	0.2%
Cd	CdO	1.4	0.2%
Ni	Ni ₂ O ₃	106.4	0.2%
As	Na ₃ AsO ₄ ·12H ₂ O*	81.6	0.2%

注: * 因 As 的氧化物为剧毒物品, 管制严格, 故使用 Na₃AsO₄·12H₂O.

2.2 水泥烧制及样品制备

将各种重金属化学试剂 (以重金属元素质量计) 以 0.2% 的添加比例与生料混合均匀后, 加适量蒸馏水搅拌至均匀制成直径 80mm 厚度 15mm 小试饼. 将试饼平放在托盘中, 在电热鼓风箱中恒温 105℃ 干燥 2h, 随即转入白金托盘, 放入高温电炉中进行烧制. 高温炉的温度在 30min 内由室温升至 1000℃, 在 1000℃ 下恒温保持 30min, 而后在 30min 内由 1000℃ 升至 1400℃, 并在 1400℃ 下恒温保持 1h, 然后冷却至室温, 最后将上述烧制合格的熟料加入质量分数为 5% 的石膏, 磨制成比表面积为 310 m² kg⁻¹ 的粉末制成水泥样品. 混凝土试块的制备及养护参照 JGJ 55-2000 (《普通混凝土配比设计规程》) 和 GB/T 5001-2002 (《普通混凝土力学性能试验方法标准》). 养护好的混凝土试块进行破碎, 碾磨至粒径小于 1mm.

2.3 样品碳酸化处理

取部分研磨好的混凝土粉末置于真空干燥器

(底部装有约为 1L 的水, 以维持干燥器内空气相对湿度为 60%) 中并将其内空气抽出至真空后充入 CO_2 (用 Na_2CO_3 与盐酸自行制备) 至内外气压一致后密封, 使之发生碳酸化反应. 12h 后将该干燥器气体抽出, 并重新充入 CO_2 密封保存, 如此多次重复该操作后, 取出少许样品, 喷入 1% 酒精酚酞溶液 (1g 酚酞, 50mL (95%) 的乙醇和 50mL 去离子水). 如果呈红色, 说明碳酸化未完全, 则继续进行碳酸化; 如果呈无色, 表明碳酸化完全. 将碳酸化完全后的混凝土粉末 (以下称为碳酸化样品) 和未进行碳酸化处理的混凝土粉末 (以下称未碳酸化样品) 在 105°C 下干燥 2h 保存备用.

2.4 浸出方法

浸出方法参照欧盟标准化组织制定的 pH 静态试验 (pH-dependence test) (CEN, 2003). 准确称取备用的碳酸化样品 15 g 共 10 份装入 250 mL 可密封的塑料瓶. 分别加入 150mL 浸取液 (液固比为 10:1, $\text{L} \cdot \text{kg}^{-1}$) 后置于翻转振荡器上振荡 (转速为 $10 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$) 48h. 浸取液由去离子水滴加硝酸或氢氧化钠制得, 加入硝酸或氢氧化钠的量由预实验确定, 将其平均分为 3 份, 分别在初始时刻 t_0 、 $t_0 + 30 \text{ min}$ 、 $t_0 + 2 \text{ h}$ 时刻向塑料瓶中加入 $4 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的硝酸或氢氧化钠溶液 (加酸或碱之前停止振荡, 静置 5 min), 确保 10 份浸出液的 pH 达到预设的 12.00 ± 0.05 、 11.00 ± 0.05 、 10.00 ± 0.05 、 9.00 ± 0.05 、 8.00 ± 0.05 、 7.00 ± 0.05 、 6.00 ± 0.05 、 5.00 ± 0.05 、 4.00 ± 0.05 和 3.00 ± 0.05 系列. $t_0 + 44 \text{ h}$ 和 $t_0 + 48 \text{ h}$ 时刻的 pH 变化范围控制在 ± 0.3 之内, 以确保浸取达到平衡. 振荡 48 h 后静止 10 min, 浸出液过 $0.45 \mu\text{m}$ 滤膜, 滤液定容保存待测. 以未碳酸化样品为对照, 同时做平行和空白.

2.5 分析方法

浸出液中的重金属离子浓度采用电感耦合等离子体质谱法 (ICP-MS 安捷伦 7500CS) 测定, 水样保存及测定参照 EPA2008 标准.

3 结果 (Results)

3.1 混凝土的酸中和容量 (ANC)

用浸出液达到一定 pH 时消耗硝酸溶液的量表示混凝土的酸中和容量 (ANC). 未碳酸化和碳酸化样品的酸中和容量曲线见图 1. 由于碳酸化样品在不滴加硝酸的情况下浸出液的 pH 为 9.2 为了便于比较, 实验中向碳酸化样品中加入氢氧化钠使得其

浸出液的 pH 值与未碳酸化样品浸出液的 pH 值一致.

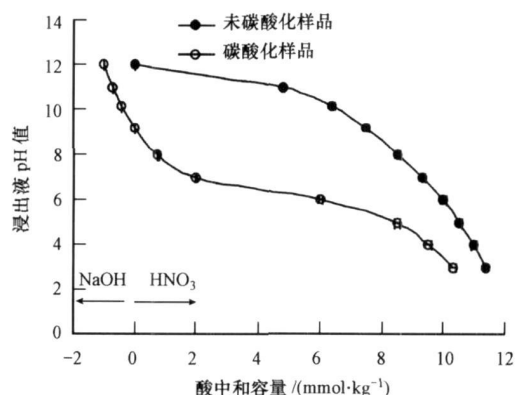


图 1 混凝土样品的酸中和容量 (ANC)

Fig 1 Acid neutralization capacity of concrete samples

由图 1 可知, 未碳酸化样品浸出液的 pH 值从 12 降到 7, 需消耗 $9 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝酸, 表明混凝土的酸中和容量较大. 而 pH 从 7 降到 3 的过程中仅消耗了 $2 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝酸, 混凝土的酸中和容量有所下降. 碳酸化样品的酸中和容量变化曲线与未碳酸化样品有较大的差异. 酸加入量为 $2 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, pH 从 12 迅速降到 7, 可见碱性条件下, 碳酸化作用导致酸缓冲能力大幅下降. 而浸出液的 pH 从 6.5 降低到 5.5 的过程中需要消耗 $6.5 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硝酸, 酸中和容量曲线在该范围内维持一段相对稳定状态, 表明该区间内混凝土的缓冲能力较强.

3.2 重金属的浸出

不同 pH 浸出液中, 液固相达到平衡时, 碳酸化和未碳酸化样品浸出液中各重金属的浸出量 (以浸出液中重金属浓度 ρ 表示) 见图 2.

3.2.1 Cr 未碳酸化样品和碳酸化样品 Cr 的浸出量随浸出液 pH 的变化趋势一致. 在 $\text{pH} < 4$ 和 $\text{pH} > 7$ 条件下浸出量较大, 并在 pH 约为 5.5 时, Cr 的浸出量最小, 分别为 $5 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.02 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$. pH = 11 时升至最大, 与 pH = 3 的浸出量大致相等. 两种样品中 Cr 的浸出量变化趋势并无多大差异, 但总体上未碳酸化样品 Cr 的浸出量要大于碳酸化样品, 尤其在 pH 为 4~6 之间.

3.2.2 Ni 两种样品中 Ni 的浸出量随浸出液 pH 的变化趋势基本一致, 浸出液 $\text{pH} < 4$ 时浸出量均保持在较高水平并相对稳定, 之后快速减小并分别在 pH = 10.15 (碳酸化) 和 11 (未碳酸化) 时达到最小值, 此后又随 pH 增大而略有增加. 总体而言, 碳酸

化样品 N 的浸出量要小于未碳酸化样品, 且在 pH 为 4~ 11 之间的差异较大.

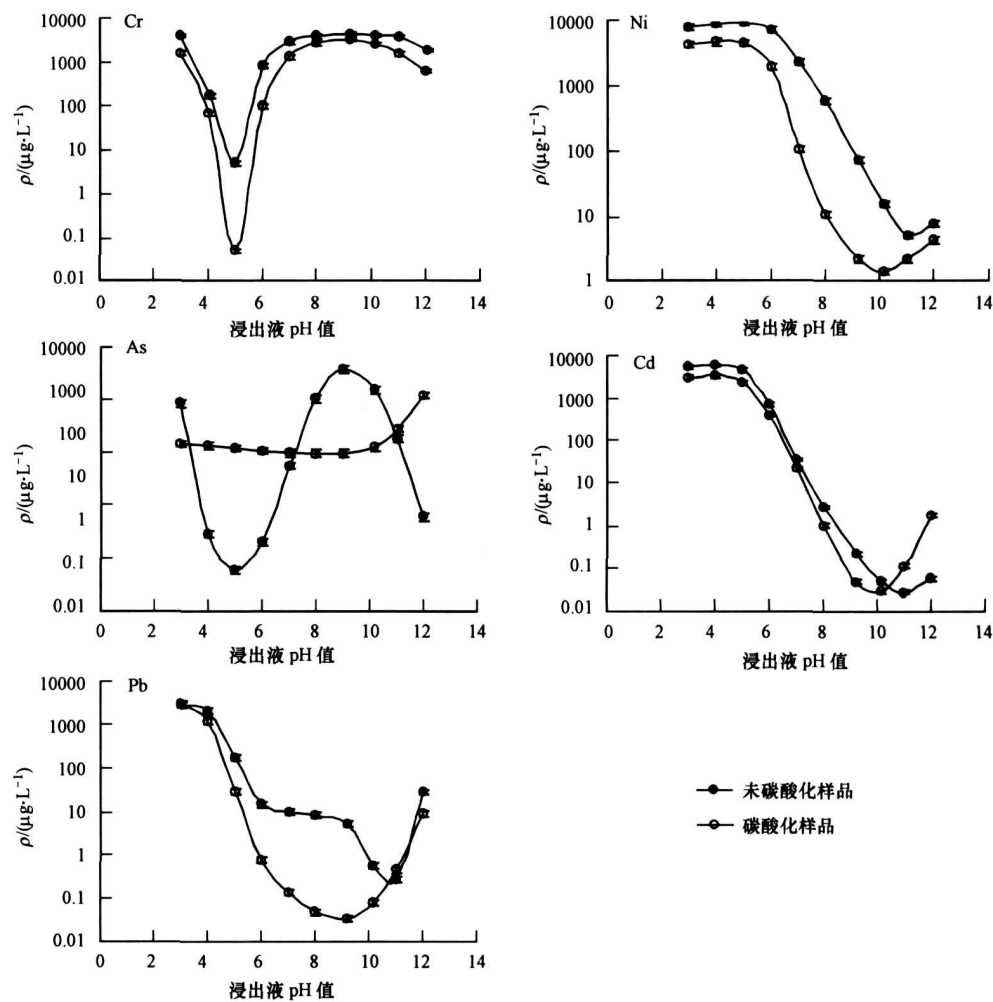


图 2 未碳酸化和碳酸化混凝土中重金属浸出量与 pH 关系曲线
Fig 2 Leaching of heavy metals from noncarbonated and carbonated concrete as a function of pH

3 2 3 As 碳酸化作用对混凝土中 As 释放影响较大. 未碳酸化样品中 As 的浸出量随浸出液 pH 的增加呈先降后升再降的趋势, 拐点出现在 pH = 5 和 9 而碳酸化样品中 As 的释放曲线发生了明显变化, pH < 10 时, 随着 pH 的减小, As 的浸出量缓慢增加; pH > 10 时, As 的浸出量随着 pH 的增加而迅速增加.

3 2 4 Cd 碳酸化作用对 Cd 的浸出量变化趋势没有影响 (先降后升), 但两种样品的浸出量有一定差异. 约在 pH < 10.5 区间内, 碳酸化作用降低了 Cd 的浸出, 而在 pH > 10.5 后, 碳酸化样品 Cd 的浸出量大于未碳酸化样品. 两种样品出现最小浸出量的 pH 不同, 分别为 10 和 12

3 2 5 Pb 碳酸化作用在 pH 为 5~ 11 区间内对 Pb 浸出影响较明显, 在 pH 为 5~ 9 时浸出量随着

pH 的增加而降低, 在 pH = 9 时降至最小, 之后随着 pH 的增加而增加. 未碳酸化样品中 Pb 的浸出量在 pH 为 5~ 9 时基本保持不变, 并且浸出量较低, pH 为 9~ 11 时则随着 pH 的增加而迅速降低, 在 pH = 11 时达到最小值.

4 讨论 (Discussion)

4 1 混凝土酸中和容量 (ANC) 及碳酸化作用

酸中和容量是指中和一定的碱度 (pH 降低到一定值) 所需酸的量 (Sanchez *et al*, 2000), 常用来衡量材料在外界影响 (酸化、空气中或生物降解产生的 CO₂, 硫化物的氧化) 下对 pH 改变的缓冲能力. 未发生碳酸化作用的混凝土的酸中和容量较酸不敏感土壤 (富含 CaCO₃ 的紫色砂页岩发育的石灰性紫色土) 的酸中和容量高出约 1~ 2 个数量级 (吴

甫成, 2001). 水泥水化过程会产生大量的氢氧化钙, 释放 OH^- 的能力较强是混凝土具有较大酸中和容量的主要原因 (Sanchez *et al*, 2000, 2003).

碳酸化作用大大减少了混凝土中氢氧化钙的量, 导致碱性条件下酸缓冲能力大幅下降. 而弱酸性条件下具有较大的酸中和容量是由于碳酸化作用产生的碳酸钙有一定的酸缓冲作用, 这与 Garrabrants (2004) 的研究结果相一致.

对酸起缓冲作用的物质不同是两者差异的原因. 未碳酸化样品主要是由 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不断释放的 OH^- 中和大量的 H^+ , 而碳酸化样品主要由碳酸化的产物 CaCO_3 与 H^+ 反应而消耗 H^+ . 由此可见, 碳酸化作用在碱性条件下能大大降低混凝土的酸中和容量, 减弱对酸的缓冲能力, 这可能会增加混凝土中某些重金属因酸溶而浸出的风险.

4.2 碳酸化作用对重金属的浸出的影响

碳酸化作用会使水泥基材孔隙水的 pH 降低 2 ~ 3 (Garrabrants *et al*, 2004). Sanchez (2002) 的研究表明, 碳酸化作用能将混凝土孔隙水的 pH 从 12.4 降低至 9.3 而 pH 是影响混凝土中重金属浸出的一个重要因素 (Van der Sloot *et al*, 2001; Van der Sloot, 2000, 2002).

碳酸化作用并未对混凝土中 Cr 和 Ni 变化趋势产生影响, 这是由于该两种重金属在混凝土中分别主要以 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 、 CrO_4^{2-} 和 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 的形式存在, 而碳酸化并没有改变这些化合物在不同 pH 区间的溶解性 (Van der Sloot, 2000; Van der Sloot *et al*, 2004; 杨昱等, 2008). 但碳酸化作用降低了混凝土中 Cr 和 Ni 的浸出量, 是由于碳酸化作用产生的碳酸钙会与浸出液中的 H^+ 反应, 消耗了与 $\text{Cr}(\text{OH})_3$ 和 $\text{Ni}(\text{OH})_2$ 发生反应的 H^+ . 同时, 浸取液中游离的 CO_3^{2-} 可能与混凝土中 Cr^{3+} 生成难溶的 $\text{Cr}_2(\text{CO}_3)_3$, 从而导致 Cr 和 Ni 的浸出量降低, 这与 Sanchez (2002) 关于“碳酸化作用会增加水泥基材对 Cr Ni 的保持力”的研究结论吻合.

碳酸化作用对 As 的释放曲线有明显影响, 表明 As 作为一种被吸附的物质 ($\text{Ca}_3\text{As}_2\text{O}_4$) 在碳酸化样品中稳定化或是在水泥矿物相中发生了取代作用 (Garrabrants *et al*, 2004); pH > 10 时, As 主要吸附于含钙矿物相, 而碳酸化作用会使硅酸盐矿物相发生脱钙效应, 从而减少了 As 的吸附相, 表现为 As 的浸出量随着 pH 的增加而迅速增加.

Cd 主要以 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 CdCO_3 的形式存在于混

凝土中, 这两种化合物在 pH 为 9~12 区间溶解度很低, 导致 Cd 在该 pH 范围内浸出量很低. 两性化合物 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 在 pH > 12 时会被溶解, 导致浸出量迅速增加 (杨昱等, 2008), 而 pH 为 5~9 时, 混凝土中的 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 会与溶液中的 H^+ 反应生成 Cd^{2+} , 浸出量随着 pH 的减小而增加. 在 pH < 5 时, 浸出量基本保持不变, 可能是此时的浸出量达到了混凝土中 Cd 的有效浸出量 (Garrabrants *et al*, 2004). 碳酸化作用对 Cd 的浸出量变化趋势影响不大, 只是影响了最小浸出量对应的 pH 值 (pH = 10), 这一方面是因为碳酸化作用产生的碳酸钙消耗了部分 H^+ , 使得在 pH = 10 时混凝土中的 Cd 以 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 存在; 另一方面是由于碳酸钙和 H^+ 反应生成的 CO_3^{2-} 与 $\text{Cd}(\text{OH})_2$ 和 H^+ 反应生产的 Cd^{2+} 反应, 生成 CdCO_3 沉淀的缘故.

碳酸化作用对混凝土孔隙水 pH 的降低及生成 PdCO_3 沉淀是在 pH = 5~11 范围内影响 Pb 浸出量的主要原因.

碳酸化作用降低了混凝土中 Cr Ni Cd Pd 的浸出量, 对混凝土实际使用的安全性是有利的, 但在较大 pH 范围内 (pH = 3~7 和 pH > 11), 碳酸化作用使得 As 的浸出量增加了 2 个数量级, 因此, 对混凝土中重金属溶出的安全性评价应重点关注 As.

碳酸化对重金属浸出的影响机理仍缺乏真正有效的研究, 文中对某些现象的解释是根据其它学者相关的研究报道及化学反应理论进行的适当推测. 深入探究碳酸化作用对重金属浸出的影响需要通过微观测试手段了解混凝土中重金属的存在形态及其变化, 因此, 在下一步的研究中重点应进行这方面的工作.

5 结论 (Conclusions)

1) 碳酸化作用降低了混凝土碱性条件下的酸中和能力, 却增加了弱酸性条件下的酸中和能力.

2) 碳酸化作用能降低混凝土中重金属 (As 除外) 的浸出量, 但在不同 pH 条件下这种影响不同. 在较大 pH 范围内, 碳酸化作用能增加 As 的浸出量.

3) 碳酸化作用对混凝土中不同重金属的浸出影响有差异, 其中, Cr Ni Cd Pb 4 种元素的浸出趋势几乎不受碳酸化改变, 只是浸出量的最小值及出现最小值时的 pH 值发生变化; 但碳酸化作用使 As 的浸出曲线发生了明显改变.

4)碳酸化作用生成的碳酸根离子与混凝土中的钙形成碳酸钙沉淀,发生脱钙效应,从而影响混凝土中各重金属元素的浸出。

责任作者简介: 黄启飞 (1973—), 男, 博士, 中国环境科学研究院副研究员, 硕士生导师, 中国环境科学研究院科技创新基地首席专家助理。主要从事危险废物政策和管理、环境风险评价、生活垃圾填埋技术等方面的研究工作, 并取得突出成绩。承担国家“十一五”科技支撑计划、“863”等省部级以上研究课题 20 余项。在国内外核心期刊上发表 80 余篇论文, 其中 SCI 论文 8 篇, 并合作申请专利 6 项, 参与专著编写 2 部, 并多次获得省部级科研奖励。

参考文献 (References):

白轲, 杨元霞, 何智海, 等. 2008 浅析混凝土碳化机理及其影响因素 [J]. 粉煤灰综合利用, (2): 54—56

Bai K, Yang Y X, He Z H, *et al*. 2008. Elementary talk about the mechanism and influencing factors of concrete carbonation [J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, (2): 54—56 (in Chinese)

CEN. 2003. P EN14429 pH dependence leaching test horizontal standard Leaching behavior tests influence of pH on leaching with initial acid/base addition horizontal standard [S]. Secretariat Horizontal

CEN. 2006 ENV12920 Characterization of waste Methodology for the Determination of the Leaching Behaviour of Waste under Specified Conditions [S]. British authority of the Standards Policy and Strategy Committee

Garrabrants A C, Sanchez F, Kosson D S. 2004 Changes in constituent equilibrium leaching and pore water characteristics of a Portland cement mortar as a result of carbonation [J]. Waste Management 24 (1): 19—36

柳俊哲, 吕丽华, 李玉顺. 2005 混凝土碳化研究与进展 (2)——碳化速度的影响因素及碳化对混凝土品质的影响 [J]. 混凝土, (12): 10—14

Liu J Z, L L H, Li Y S. 2005 Review of carbonation in reinforced concrete (II): Factors influencing carbonation rate of concrete and carbonation effect on concrete structure [J]. Concrete, (12): 10—14 (in Chinese)

Macias A, Kindness A, Gasser F P. 1997 Impact of carbon dioxide on the immobilization potential of cemented wastes chromium [J]. Cement and Concrete Research 27 (2): 215—225

Petkovic G, Engelsen C J, Breedveld G, *et al*. 2004 Environmental impact from the use of recycled materials in road construction method for decision-making in Norway [J]. Resources Conservation and Recycling 42 (3): 249—264

屈文俊, 陈道普. 2007 混凝土碳化的随机模型 [J]. 同济大学学报 (自然科学版), 35 (5): 577—581

Qu W J, Chen D P. 2007 Stochastic model of concrete carbonation [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 35 (5): 577—581 (in Chinese)

Sanchez F, Bama R, Garrabrants A, *et al*. 2000 Environmental assessment of a cement-based solidified soil contaminated with lead [J]. Chemical Engineering Science 55 (1): 113—128

Sanchez F, Garrabrants A C, Vandecasteele C, *et al*. 2003 Environmental assessment of waste matrices contaminated with arsenic [J]. Hazard Mater 96 (2/3): 229—257

Sanchez F, Gervais C, Garrabrants A C. 2002 Leaching of inorganic contaminants from cement-based waste materials as a result of carbonation during intermittent wetting [J]. Waste Management 22 (2): 249—260

Van der Sloot H A. 2000 Comparison of the characteristic leaching behavior of cements using standard (EN 196-1) cement mortar and an assessment of their long-term environmental behavior in construction products during service life and recycling [J]. Cement and Concrete Research 30 (7): 1079—1096

Van der Sloot H A. 2002 Characterization of the leaching behaviour of concrete mortars and of cement-stabilized wastes with different waste loading for long-term environmental assessment [J]. Waste Management 22 (2): 181—186

Van der Sloot H A, de Nijl D S, Spanka G, *et al*. 2004 Leaching data for cement mortar [R]. Netherlands ECO-Serve Cluster 1 Deliverable 3

Van der Sloot H A, Hoede D, Cresswell D J F, *et al*. 2001. Leaching behaviour of synthetic aggregates [J]. Waste Management 21 (3): 221—228

吴甫成, 王晓燕, 邹君, 等. 2001 湖南土壤酸缓冲性能研究 [J]. 农业现代化研究, 22 (1): 58—62

Wu F C, Wang X Y, Zou J *et al*. 2001 A study on acidic buffering ability of soils in Hunan Province [J]. Research of agricultural Modernization, 22 (1): 58—62 (in Chinese)

杨昱, 杨玉飞, 黄启飞, 等. 2008 废物水泥窑共处置产品中重金属释放 pH 静态试验研究 [J]. 环境科学研究, 21 (6): 52—56

Yang Y, Yang Y F, Hang Q F. 2008 pH-dependence test study on the release of heavy metals in cement product from co-processing waste in cement kiln [J]. Research of Environmental Sciences 21 (6): 52—56 (in Chinese)

余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 2003 盐湖地区干燥气候和碳化作用对混凝土强度和耐久性的影响 [J]. 混凝土, (10): 28—31

Yu H F, Sun W, Yan L H, *et al*. 2003. Durability of concrete in salt lake Influences of desiccation and carbonation [J]. Concrete, (10): 28—31 (in Chinese)

张海燕, 把多铎, 王正中. 2006 混凝土碳化深度的预测模型 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 39 (5): 42—45

Zhang H Y, Ba D D, Wang Z Z. 2006. A model for forecasting carbonization depth of concrete [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 39 (5): 42—45 (in Chinese)

赵明辉. 2004 浅析混凝土碳化机理及其碳化因素 [J]. 吉林水利, (8): 17—18

Zhao M H. 2004 Analysis for the carbonation mechanism and factor of concrete [J]. Jilin Water Resources (8): 17—18 (in Chinese)