

张新艳, 王起超, 张少庆, 等. 2009 沸石作稳定化剂固化 / 稳定化含汞危险废弃物试验 [J]. 环境科学学报, 29(9): 1858– 1863
Zhang X Y, Wang Q C, Zhang S Q *et al*. 2009 Stabilization / solidification (S / S) of mercury-contaminated hazardous wastes using natural zeolite and Portland cement [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(9): 1858– 1863

沸石作稳定化剂固化 / 稳定化含汞危险废弃物试验

张新艳^{1, 2}, 王起超^{1, *}, 张少庆^{1, 3}, 孙晓静^{1, 2}, 张仲胜^{1, 2}

1 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 长春 130012
2 中国科学院研究生院, 北京 100049
3 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118
收稿日期: 2008-12-03 修回日期: 2009-03-11 录用日期: 2009-06-17

摘要: 利用沸石对汞的吸附性, 将沸石作为稳定化剂掺入水泥进行含汞危险废弃物固化 / 稳定化试验研究. 同时, 探讨了沸石作为稳定化剂的水泥固化技术处理含汞废弃物的影响因素, 从而明确这种方法的可行性和最佳操作条件. 结果表明, 沸石的掺入能够促进汞的稳定, 与单独使用水泥相比固化效率显著提高. 当沸石用量为 0.3 g g⁻¹ 以上时, 固化体浸出汞浓度低于国家标准 (GB 5085.3-2007), 固化效率从单独使用水泥固化时的 47% 提高到 95% 以上. 氯离子能够影响固化效率, 即使在氯离子浓度为 10 mmol L⁻¹ 时, 含汞 1000 mg kg⁻¹ 以下的固体废弃物的固化效率仍能够大于 90%. 这说明即使存在氯离子干扰的情况下, 沸石作稳定化剂固化含汞危险废物仍然是非常经济有效的方法. 实验得到沸石作稳定化剂固化含汞危险废弃物的最佳操作条件为 pH = 6.0~7.0 之间, 沸石量为 0.4 g g⁻¹, 水泥量为 0.7 g g⁻¹ 以上.
关键词: 汞; 浸出性; 沸石; 固化; 稳定化; 危险废弃物

文章编号: 0253-2468 (2009) 09-1858-06 中图分类号: X705 文献标识码: A

Stabilization / solidification (S / S) of mercury-contaminated hazardous wastes using natural zeolite and Portland cement

ZHANG Xinyan^{1, 2}, WANG Qichao^{1, *}, ZHANG Shaoqing^{1, 3}, SUN Xiaojing^{1, 2}, ZHANG Zhongsheng^{1, 2}

1 Northeast Institute of Geography and Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130012
2 Graduate School of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049
3 College of Resources and Environment, Jilin Agricultural University, Changchun 130118

Received 3 December 2008 received in revised form 11 March 2009; accepted 17 June 2009

Abstract Since zeolite can absorb mercury, zeolite was mixed into cement to stabilize / solidify mercury in solid waste. Experiments were carried out to study the factors affecting the whole stabilization / solidification (S / S) process, and thereby certify the feasibility and the optimum conditions for this work. Compared with cement alone, adding zeolite into cement was more effective in stabilizing Hg in the waste surrogate. When 0.3 g g⁻¹ zeolite was added, the stabilization efficiency increased from 47% to 95%, and the concentration of Hg leaching from the solid was lower than the national standard. The Cl⁻ content could reduce the stabilization efficiency. However, even though the Cl⁻ concentration in the stabilization solution was 10 mmol L⁻¹, the stabilization efficiencies for the surrogate with less than 1000 mg kg⁻¹ Hg were over 90%, which indicated that whether or not Cl⁻ is present, the (S / S) process of mixing zeolite into Portland cement is an effective technology to treat waste containing mercury. The optimum conditions for treating solid waste with mercury are pH = 6.0~7.0, zeolite dosage 0.4 g g⁻¹, and cement content more than 0.7 g g⁻¹.

Keywords mercury; leachability; zeolite; solidification; stabilization; hazardous wastes

1 引言 (Introduction)

重金属汞是国际公认的六大毒物之一, 而含汞化合物也一直受到人们的广泛关注和重视. 汞能在环境中长期存在, 并能从无机态汞转化为毒性更强

的有机态汞, 进而沿着食物链传递累积, 给周围环境和人类健康造成更大的威胁 (Chang *et al*, 1993; Fthenakis *et al*, 1995). 含汞危险废弃物主要来自氯碱生产、电线设备和开关制造、锌铜冶炼和金矿开采、照明和牙科工作等工业生产过程 (US EPA,

1997),这些含汞危险废弃物给人类健康和环境造成了极大的危害.因此,发展可靠的技术来严格控制这些含汞危险废弃物中汞的浸出,使其不能迁移到环境中对人类生存环境造成更恶劣的影响,是关系到人类生存安全的重要的挑战.固化/稳定化技术能够成功降低 Pb、Cd、Cr等重金属的浸出性,但由于汞特有的毒性特征,如挥发性强、毒性强和生物累积性强以及工业含汞废弃物成分复杂等原因,使得传统的固化/稳定化技术并不能有效地治理含汞危险废弃物(Conner 1990).因此,发展针对含汞危险废弃物的固化/稳定化技术是人类面临的一项重要任务.

天然沸石是岩石圈上部分布最广的架状硅酸盐矿物之一,也是一种对环境无污染的矿物材料(鲁安怀,1999).由于其具有经济、有效、易获得、来源丰富等特点而日益受到国内外学者的重视,已有大量的研究将其成功地应用于含汞废水和废气的净化处理中(Chojacki *et al.*, 2004; Ricardo, 2006; 任建莉等, 2007).另一方面,沸石是一种无机矿物

材料,可以作为水泥生产中的一种掺合料,起到降低水泥成本和提高水泥抗渗、抗冻等性能的作用(张虹等,1997).因此,本文利用沸石对汞的吸附性和它作为无机矿物与水泥的相容性,将沸石作稳定化剂掺入水泥中进行含汞危险废弃物固化/稳定化试验研究.同时,对影响沸石作稳定化剂固化处理含汞废弃物效果的因素进行探讨,并对实际沉积物样品进行固化,进而明确这种方法的可行性和最佳操作条件,以期在实际样品的固化/稳定化操作提供理论依据.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 材料

沸石样品是采集于吉林省九台市沸石矿业公司的天然斜发沸石,粒径为 300目,用蒸馏水洗涤后自然风干待用,斜发沸石化学成分如表 1所示.将固体硝酸汞、沙子(过 1mm 筛)和去离子水混合均匀,配成一定汞含量的模拟废物,在通风橱内干燥养护 3d备用.

表 1 天然斜发沸石的化学组成及含量
Table 1 Chemical composition of natural zeolite

SiO ₂	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅
73.76%	11.20%	3.04%	2.10%	1.08%	0.98%	0.64%	0.04%	0.02%	0.01%

2.2 模拟废物的固化过程

在 100g 含汞 300mg·kg⁻¹的模拟废弃物中加入 50mL 去离子水和 1.0g 沸石,用 0.1mol·L⁻¹ HNO₃和 0.1mol·L⁻¹ NaOH 调整 pH 保持为 6.0.在室温(25℃)下振荡 24h.离心过滤后测定滤液中汞浓度,固体部分在 40℃下干燥后加入水泥,用去离子水混合均匀,浇注到模子中在室温下进行养护.固化体 1d 之后脱模,5d 后粉碎到尺寸小于 9.5mm,做毒性浸出实验.初始沸石掺入量为 0.1g·g⁻¹ ($m_{沸石}:m_{模拟废物}=0.1$),水泥量为 1.0g·g⁻¹ ($m_{水泥}:m_{模拟废物}=1.0$).

为了检验沸石作为稳定化剂添加到水泥中的固化/稳定化效果,分别调整稳定化的 pH、沸石掺入量和水泥量等,通过测定稳定化后滤液中的汞浓度和固化体浸出汞浓度来评价其对汞的固化/稳定化效果.

2.2.1 pH 的影响 用 0.1mol·L⁻¹ HNO₃或 NaOH 调整稳定化的 pH 分别为 3.0、4.0、5.0、6.0、7.0、8.0、9.0、10.0、11.0 和 12.0,以沸石量为 0.1

g·g⁻¹,水泥量为 1.0g·g⁻¹固化含汞模拟废弃物(汞含量 300mg·kg⁻¹).

2.2.2 沸石掺入量的影响 调整沸石量分别为 0.1、0.2、0.3、0.4 和 0.5g·g⁻¹,水泥量为 1.0g·g⁻¹固化含汞模拟废弃物(汞含量 300mg·kg⁻¹).同时,将含汞模拟废弃物直接和水泥混合进行固化,与掺入沸石作稳定化剂的稳定结果进行对比研究.

2.2.3 氯离子的干扰 在稳定化溶液中分别加入 50mL(10和 1mmol·L⁻¹) Cl⁻溶液,以沸石量为 0.1g·g⁻¹,水泥量为 1.0g·g⁻¹固化含汞量分别为 50、100、200、300、500、750 和 1000mg·kg⁻¹的模拟废弃物.

2.2.4 水泥加入量的影响 调整水泥用量为 0.5、0.7、1.0、1.5 和 2.0g·g⁻¹,沸石量为 0.1g·g⁻¹固化含汞模拟废弃物(汞含量 300mg·kg⁻¹).

2.3 毒性浸出实验

按照毒性浸出实验方法 GB 5085.3-2007 将固化体样品经研磨处理,使其尺寸小于 9.5mm.按照 1:10 固液比(质量体积比, g:mL)加入由硫酸和硝酸混合配制成的 pH 为 3.20±0.05 的浸提液,调节转

速为 $(30 \pm 2) \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 于 $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$ 下翻转振荡 $(18 \pm 2) \text{ h}$ 后, 离心测定上清液中汞浓度.

2 4 最佳操作条件下模拟和实际样品的固化

根据上面影响因素确定实验的最佳操作条件, 并固化模拟样品和来自葫芦岛市五里河沉积物样品, 用固化体浸出汞浓度来评价固化效果.

3 结果 (Results)

3 1 模拟含汞废物的稳定化效果

为了评价沸石掺入后对模拟废物的稳定化作用, 测定稳定化后滤液中汞浓度和固化后固化体浸出汞浓度来评价稳定化效果. 实验考察了稳定化的 pH、沸石掺入量和氯离子的干扰等对沸石稳定化作用的影响, 由此得到沸石作为稳定化剂添加到水泥的固化/稳定化的影响因素和最佳操作条件.

3 1 1 pH 对汞稳定/固定化作用的影响 按照 2 2 1 节的操作方法, 获得 pH 对沸石的稳定化作用的关系 (图 1). 从图 1 可以看出, pH 能够明显影响沸石对汞的稳定化效果, 稳定化后滤液中汞浓度和固化体中浸出汞浓度都随 pH 值变化明显. 随着 pH 的升高, 稳定化后滤液中汞浓度先降低后升高, 稳定化作用最佳的操作条件是 pH 在 6.0~7.0 之间. 从固化体浸出汞浓度变化曲线可以看出, 固化体浸出汞浓度随着 pH 值的升高而呈现先降低再升高而后再降低的变化趋势, pH = 5.0~7.0 时的固化效果最好, pH = 10.0~12.0 次之. 呈现这一规律的主要的原因是: 在 pH = 5.0~7.0 时, 有利于沸石与汞之间的离子交换反应, 即和稳定化作用的规律相一致; 另一方面, 加入水泥进行固化以后, 水泥的水合作用会产生强碱性环境, 一部分汞会以氧化汞的形式被沉淀下来, 而以氧化汞形态存在的汞迁移能力很低 (Ortego *et al.*, 1989; McWhinney *et al.*, 1990); 在 pH = 10.0~12.0 之间的强碱性环境中, 更有利于水泥的水合作用, 生成难溶性氧化汞使汞的浸出性有效降低. 从图 1 还可以看出, 综合稳定化后滤液中汞和固化体浸出汞浓度两方面考虑, 偏酸的中性环境最有利于沸石对汞的稳定化作用, 沸石稳定化操作的最佳 pH 范围为 6.0~7.0 之间, 此时无论是稳定化后滤液中的汞还是固化后固化体中浸出汞浓度都最低, 固化效果达到最佳.

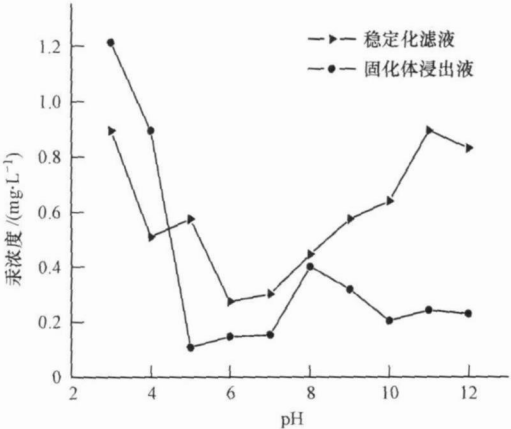


图 1 pH 对沸石稳定化作用的影响

式被沉淀下来, 而以氧化汞形态存在的汞迁移能力很低 (Ortego *et al.*, 1989; McWhinney *et al.*, 1990); 在 pH = 10.0~12.0 之间的强碱性环境中, 更有利于水泥的水合作用, 生成难溶性氧化汞使汞的浸出性有效降低. 从图 1 还可以看出, 综合稳定化后滤液中汞和固化体浸出汞浓度两方面考虑, 偏酸的中性环境最有利于沸石对汞的稳定化作用, 沸石稳定化操作的最佳 pH 范围为 6.0~7.0 之间, 此时无论是稳定化后滤液中的汞还是固化后固化体中浸出汞浓度都最低, 固化效果达到最佳.

3 1 2 沸石掺入量对汞稳定/固定化的影响 按照 2 2 2 节的操作方法, 获得沸石掺入量对稳定化作用的关系如图 2 所示. 从图 2 可以看出, 随着沸石掺入量的增加, 稳定化滤液和固化体浸出汞浓度都明显降低. 未掺入沸石进行稳定化处理时, 滤液中汞浓度为 $18.7 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 而沸石掺入量仅为 $0.1 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 稳定化滤液汞浓度就降低到 $0.3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下.

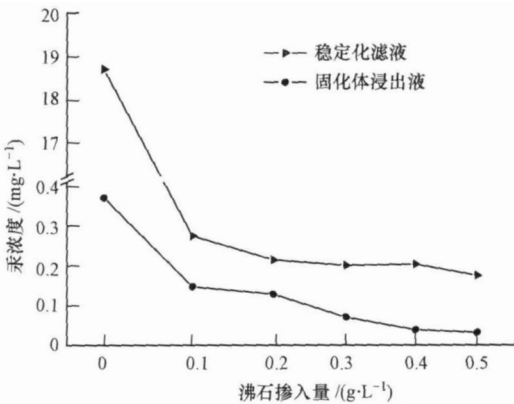


图 2 沸石掺入量对汞的稳定化作用的影响

Fig 2 The effect of zeolite dosage on mercury stabilization

为了评价掺入沸石对汞的稳定化作用, 本研究进一步从固化效率的角度评价沸石作为稳定化剂添加到水泥中的固化/稳定化效果.

$$E = \frac{T_{\text{un}} - T}{T_{\text{un}}} \times 100\% \tag{1}$$

式中, E 表示固化效率, T_{un} 表示未经固化处理的原始含汞废弃物浸出汞浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$), T 是固化/稳定化操作以后固化体浸出汞浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$).

由图 2 还可以看出, 掺入沸石以后, 固化体浸出汞浓度显著降低. 当沸石掺入量为 $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 固化体浸出汞降低到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下; 当沸石掺入量为 $0.4 \sim 0.5 \text{ g} \cdot \text{g}^{-1}$ 时, 固化体浸出汞降低到 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 低于我国危险废物鉴别标准规定

的 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 并且固化效率从单独使用水泥时的 47% 提高到 95% 以上. 沸石掺入量在 $0.4\sim 0.5\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 之间, 固化 / 稳定化的效果最佳.

3.1.3 氯离子对含汞废弃物稳定 / 固定化的影响

很多研究表明, 氯离子能够影响含汞危险废弃物的水泥固化效果. 因此, 本文为了考察氯离子对掺入沸石作稳定化剂的水泥固化 / 稳定化效果, 按照 2.2.3 节的操作方法进行实验, 结果见图 3. 由图 3a 可以看出, 氯离子能够影响沸石的稳定化作用, 但是影响效果不明显. 随着稳定化溶液中氯离子浓度从 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 滤液中汞浓度有所升高, 但是相比以水作稳定化溶液升高幅度不大, 即使在氯离子为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的情况下增幅仍然很小. 由图 3b 可以看出, 氯离子对固化体浸出汞浓度影响比对滤液中汞离子浓度的影响大, 尤其是在氯离子为 $10\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时. 但是在氯离子浓度在 $1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (相当于天然背景值 $0.1\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 10 倍) 时, 相对于水作稳定化溶液而言, 固化体浸出汞浓度几乎没有变化, 这说明沸石作稳定化剂固化含

汞危险废弃物受低浓度氯离子的影响不大, 而高浓度氯离子的影响较明显.

3.1.4 水泥量对汞稳定 / 固定化的影响 按照 2.2.4 节的操作方法, 获得水泥加入量对固化效果的影响, 结果如图 4 所示. 从图 4 可以看出, 随着水泥量的增加, 固化体浸出汞浓度大致上呈现降低趋势, 稳定化作用增强. 在水泥量大于 $0.7\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以后固化体浸出 Hg^{2+} 浓度相对比较平缓, 尤其是水泥量大于 $1.5\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以后几乎没有变化. 因此, 水泥量大于 $0.7\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 时, 沸石作为稳定化剂掺入水泥中固化含汞危险废弃物就可以得到最佳的固化效果.

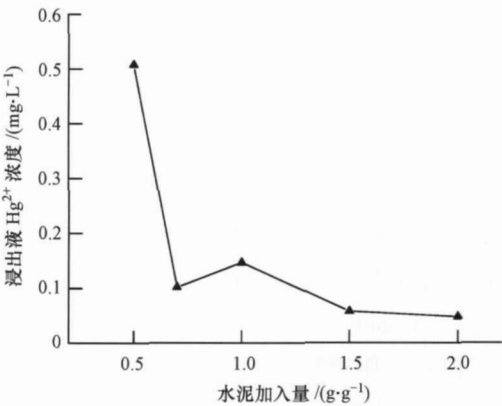


图 4 水泥加入量对固化体浸出 Hg^{2+} 浓度的影响

Fig. 4 The effect of cement dosage on mercury concentration in the S/S treated waste

3.2 模拟样品和实际样品的稳定化 / 固化效果

通过前面的模拟实验可以看出, 沸石作为稳定化剂固化含汞模拟废弃物是非常有效的, 并且固化 / 稳定化最佳操作条件分别为 $\text{pH} = 6.0\sim 7.0$. 沸石掺入量为 $0.4\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 水泥量为 $0.7\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$ 以上. 为了进一步评价这种方法的可行性, 在最佳操作条件下 ($\text{pH} = 6.0$, 沸石掺入量为 $0.4\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$, 水泥量为 $0.7\text{ g}\cdot\text{g}^{-1}$) 固化处理了模拟废物和实际样品. 实际样品是采集自辽宁省葫芦岛市五里河沉积物样品. 葫芦岛市五里河是历史上受氯碱厂汞严重污染的一条河流, 至今河流沉积物中汞含量还非常高. 实验采集的五里河沉积物样品中汞含量分别为 651 和 $420\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 按我国危险废物鉴别标准浸出汞浓度分别为 0.82 和 $0.65\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 大于 $0.1\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 属于危险废弃物. 模拟废物和实际样品固化以后做浸出汞浓度实验, 具体结果见表 2.

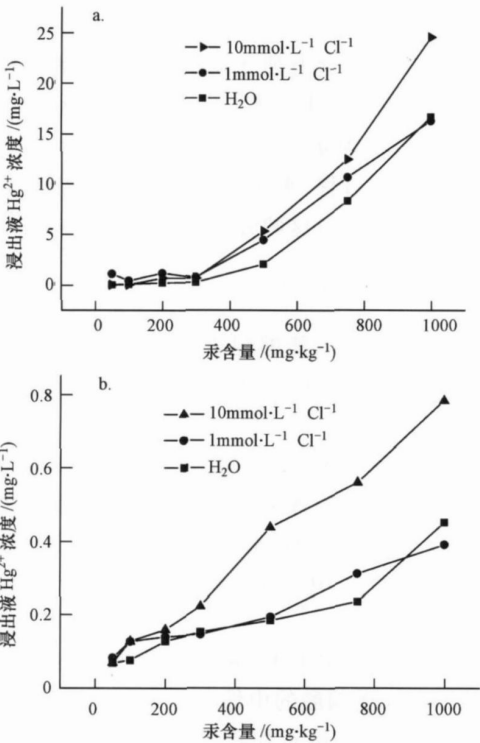


图 3 Cl^{-} 对稳定化滤液 (a) 和固化体浸出液 (b) Hg^{2+} 浓度的影响

Fig. 3 The effect of Cl^{-} on mercury concentration in stabilization filtrate (a) and mercury leaching results of S/S treated wastes (b)

表 2 最佳操作条件下模拟和实际样品的固化/稳定化处理结果
Table 2 The results of treating real and surrogate wastes under the optimum conditions

废物类型	废物汞含量 / (mg kg ⁻¹)	初始废物浸出汞浓度 / (mg L ⁻¹)	固化体浸出汞浓度 / (mg L ⁻¹)	固化效率
模拟废物	50	0.24	0.01	95.83%
	100	0.59	0.02	96.61%
	200	2.63	0.04	98.48%
	300	3.41	0.09	97.30%
	500	6.78	0.15	97.79%
	750	12.62	0.23	98.18%
	1000	13.92	0.42	96.98%
实际样品	651	0.82	0.03	95.98%
	420	0.65	0.01	97.85%

4 讨论 (Discussion)

较强酸和较强碱环境中沸石对汞的稳定化效果都会减弱,这主要是因为 pH 影响了沸石和汞之间的离子交换反应,这与沸石吸附溶液中汞的规律相一致 (Lagadic *et al.*, 2001; Mercier *et al.*, 1998). 稳定化作用最佳的操作条件是 pH 在 6.0~7.0 之间,此时无论是稳定化后滤液中的汞还是固化后固化体中浸出汞浓度都最低,固化效果达到最佳. 固化体浸出汞浓度在 pH = 10.0~12.0 时有所降低,这主要是因为加入水泥进行固化后,水泥的水合作用会导致强碱性环境,一部分汞会以氧化汞的形式被沉淀下来,而以氧化汞形态存在的汞迁移能力很低 (Ortego *et al.*, 1989; Mawhinney *et al.*, 1990). 另外,在 pH = 10.0~12.0 之间的强碱性环境更有利于水泥的水合作用,进而生成难溶性的氧化汞使汞的浸出性有效降低.

沸石的掺入能够明显地增强对汞的稳定作用. 很多研究表明,天然斜发沸石具有均匀孔径和很强的离子交换特性,对汞的吸附能力很强 (Chojnacki *et al.*, 2004; Ricardo, 2006; 任建莉等, 2007),可以用于含汞废水、废气的净化处理. 本课题组前期研究采用的天然斜发沸石对汞的吸附容量能够达到 8.06 mg g⁻¹,能够作为去除水中 Hg²⁺ 的优良吸附剂 (张新艳等, 2009),并且将天然沸石掺入到水泥中进行固化/稳定化,可明显提高对汞的固化效率.

含盐量高的固体废物中汞浸出的趋势会明显增强 (Schuster, 1991; Wang *et al.*, 1991; Feick *et al.*, 1972; Zhang *et al.*, 2002; Haishan *et al.*,

2006),这主要是由于氯离子与汞较强的亲和作用,汞与氯结合生成迁移性很强的氯化汞等. 但从图 3 中数据可以看出,虽然氯离子能够影响沸石的稳定化作用,沸石掺入对含汞废弃物的固化效果仍然很好,尤其是在氯离子浓度在 1 mmol L⁻¹ 时,固化体浸出汞浓度没有明显变化. 通过计算固化效率可以得到,在氯离子浓度在 1 mmol L⁻¹ 时,各个浓度的模拟废物的固化效率都大于 95%;氯离子 10 mmol L⁻¹ 时,固化效率都大于 90%. 这进一步证明了沸石作为稳定剂固化含汞废弃物的方法即使在氯离子干扰下仍然是非常有效的.

在固化含汞危险废弃物过程中,水泥主要起到两方面的作用:一方面是水泥的水合作用,形成固体将危险废弃物包裹起来形成坚硬的固化体,即固化作用;另一方面,水泥水和过程中会生成碱性环境,使汞形成氧化汞沉淀,而形成氧化汞以后汞的迁移力降低 (Ortego *et al.*, 1989; Mawhinney *et al.*, 1990). 因此,水泥具有一定的稳定化作用,能够提高固化效率,加大水泥量能在一定程度上提高对汞的稳定化作用. 同时,水泥水合过程的碱性环境也能够影响沸石对汞的吸附性,碱性条件下沸石吸附汞的能力会有所下降,进而会抑制沸石的稳定化作用,降低固化效率. 因此,沸石作为稳定化剂掺入到水泥中固化含汞废物是沸石和水泥共同起稳定化作用的过程,水泥加入量对固化体浸出 Hg²⁺ 浓度的影响也是对这两方面综合作用的结果.

5 结论 (Conclusions)

1)沸石的掺入能够促进汞的稳定,降低固化体中汞的浸出性,与单独使用水泥固化相比,固化效率显著提高.

2)氯离子能够影响固化过程,但是沸石作为稳定化剂对汞的固化效果仍然很好,尤其是在氯离子浓度为 1 mmol L⁻¹ 时,对汞的固化效果几乎没有影响;而在氯离子 10 mmol L⁻¹ 时,固化效率有所降低,但仍大于 90%.

3)随着 pH 值升高,沸石对汞的稳定化作用先升高后降低,在偏酸的中性条件下固化效率最高.

4)实验得到沸石作稳定化剂固化含汞危险废物的最佳操作条件为 pH 6.0~7.0 沸石掺入量为 0.4 g g⁻¹,水泥量为 0.7 g g⁻¹. 用此优化操作条件可成功地固化实际沉积物样品,因此,沸石作稳定化剂固化含汞危险废物是一种经济有效的方法.

责任作者简介:王起超,男,研究员,博士生导师, E-mail wangqichao@neigae.ac.cn

参考文献 (References):

- Chang C Y, Hsu C P, Jann J S *et al*. 1993 Stabilization of mercury-containing sludge by a combined process of two-stage pretreatment and solidification [J]. *Journal of Hazardous Materials* 35: 73—88
- Chojnacki A, Chojnacka K, Hoffmann J *et al*. 2004. The application of natural zeolites for mercury removal from laboratory tests to industrial scale [J]. *Minerals Engineering* 17(7-8): 933—937
- Conner J R. 1990. Chemical Fixation and Solidification of Hazardous Wastes [M]. New York: van Nostrand Reinhold 293—298
- Feick G, Home R A, Yeaple D. 1972 Release of mercury from contaminated freshwater sediments by the runoff of road deicing salt [J]. *Science* 175: 1142—1143
- Fthenakis V M, Lipfert F W, Moskowicz P D *et al*. 1995. An assessment of mercury emissions and health risks from a coal-fired power plant [J]. *Journal of Hazardous Materials* 44(2-3): 267—283
- Haishan P, Bishop P L. 2006 Stabilization of mercury-containing wastes using sulfide [J]. *Environmental Pollution* 139 498—506
- Lagadic I L, Mitchell M K, Payne B D. 2001 Highly effective adsorption of heavy metal ions by a thiol-functionalized magnesium phyllosilicate clay [J]. *Environmental Science & Technology* 31: 2407—2412
- 鲁安怀. 1999 环境矿物材料在土壤、水体、大气污染治理中的利用 [J]. *岩石矿物学杂志*, 18(4): 292—300
- Lu A H. 1999 The application of environmental mineral materials to the treatment of contaminated soil, water and air [J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica* 18(4): 292—300 (in Chinese)
- McWhinney H G, Cocke D L, Balke K *et al*. 1990. An investigation of mercury solidification and stabilization in Portland cement using X-ray photoelectron spectroscopy and energy dispersive spectroscopy [J]. *Cement and Concrete Research* 20: 79—91
- Mercier L, Pinnavaia T J. 1998. Heavy metal ion adsorbents formed by grafting of a thiol functionality to mesoporous silicate molecular sieves. Factor affecting Hg(II) uptake [J]. *Environmental Science & Technology* 32: 2749—2754
- Ortego J D, Jackson S, Yu G S *et al*. 1989 Solidification of hazardous substances—a TGA and FTIR study of Portland cement containing metal nitrates [J]. *Journal of Environmental Science and Health A24* 589—602
- 任建莉, 周劲松, 骆仲泱, 等. 2007. 新型吸附剂脱除烟气中气态汞的试验研究 [J]. *中国电机工程学报*, 27(2): 48—53
- Ren J L, Zhou J S, Luo Z Y *et al*. 2007. The application of novel sorbents for mercury vapor removal from simulated flue gases [J]. *Proceeding of the CSEE*, 27(2): 48—53 (in Chinese)
- Ricardo M. 2006 Efficiency of industrial minerals on the removal of mercury species from liquid effluents [J]. *Science of Total Environment* 368(1): 403—406
- Schuster E. 1991 The behavior of mercury in the soil with special emphasis on complexation and adsorption process—a review of the literature [J]. *Water Air and Soil Pollution* 56: 667—680
- US EPA. 1997 Technology Alternatives for the Remediation of Soils Contaminated with As, Cd, Cr, Hg and Pb [R]. EPA/540/S-97/500 Cincinnati, OH: US EPA Office of Research and Development 21
- Wang J S, Huang P M, Liaw W K *et al*. 1991. Kinetics of the desorption of mercury from selected freshwater sediments as influenced by chloride [J]. *Water Air and Soil Pollution* 50 533—542
- 张虹, 郑礼胜, 王士龙, 等. 1997. 高掺量沸石水泥的试验研究 [J]. *山东建材学院学报*, 11(4): 300—303
- Zhang H, Zheng L S, Wang S L. 1997 Research on high admixture zeolite cement [J]. *Journal of Shandong Institute of Building Materials* 11(4): 300—303 (in Chinese)
- Zhang J, Bishop P L. 2002 Stabilization/solidification (S/S) of mercury containing wastes using reactivated carbon and portland cement [J]. *Journal of Hazardous Materials* B92 199—212
- 张新艳, 王起超, 张少庆, 等. 2009 天然和巯基改性沸石吸附水溶液中重金属 Hg^{2+} 的特征研究 [J]. *环境工程学报*, 3(3): 455—460
- Zhang X Y, Wang Q C, Zhang S Q *et al*. 2009 Study on characterization of mercury sorption by natural and thiol modified zeolites [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering* 3(3): 455—460 (in Chinese)