

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2014.06.019

不同建筑材料对气态汞的吸附模拟研究

高小峰¹, 谷依露², 谢田¹, 刘阳¹, 黄晟¹, 赵由才¹

(1. 同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092;

2. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072)

摘要: 建筑材料的力学性质、相变蓄能、生态环保、再生利用等受到广泛关注, 但很少有关于不同建筑材料对汞的吸附研究。通过对水泥砖、泡沫混凝土、红砖、骨料、砂石等5种建筑材料细粉和水泥混凝土立方体标准试块置于恒温室内进行气态汞吸附模拟, 探索出最易受汞污染的建筑材料和水泥混凝土块的受污染深度。通过XRD和XRF对5种建筑材料分析得出其成分以SiO₂为主, 其次是CaCO₃。5种建筑材料进行汞吸附实验结果表明, 整体上粒径越小吸附量越大, 但不同材料之间存在差异性, 红砖是最容易受污染的建筑材料, 其次泡沫混凝土和砂石对汞也具有较大吸附性, 水泥砖和骨料对汞吸附能力较弱。水泥混凝土块吸附模拟表明污染主要存在于表层0~1.5 cm范围内, 汞污染严重的工厂和车间等在拆迁、改建过程中, 需要对其表层剥离, 去除汞污染。

关键词: 建筑材料; 水泥混凝土块; 汞; 吸附模拟

中图分类号: TU278.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-4764(2014)06-0112-07

Simulation of Gaseous Mercury Adsorption of Different Building Materials

Gao Xiaofeng¹, Gu Yilu², Xie Tian¹, Liu Yang¹, Huang Sheng¹, Zhao Youcai¹

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, P. R. China;

2. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, P. R. China)

Abstract: The mechanical properties, phase change energy storage, environmental protection, and recycling of building materials are extensively studied, but few studies focus on the mercury adsorption of different building materials. Five types of cement brick powder including foam concrete, red brick, aggregate and gravel as well as several standard concrete blocks were exposed to gaseous mercury in constant temperature to determine most vulnerable building material to mercury contamination and the contamination depth of concrete blocks. Results showed that small particle contributed to large mercury adsorption, however different performance was found among various materials. Red brick was the likely to have strong adsorption capacity followed by foam concrete and gravel. For concrete block, the pollution mainly concentrated at the 0~1.5 cm of the surface. As a result, for some seriously mercury polluted factories and workshops, mercury pollution can be removed by peeling the skin of the buildings before demolition, renovation process.

Key words: building materials; concrete block; mercury; adsorption simulation

收稿日期: 2014-05-20

基金项目: 国家环境保护公益性行业科研专项(201309025)

作者简介: 高小峰(1988-), 男, 主要从事建筑废物污染控制与再生利用研究, (E-mail) cug19881020@126.com。

赵由才(通信作者), 教授, 博士生导师, (E-mail) zhaoyoucai@tongji.edu.cn。

近年来,由于出现严重的雾霾天气,国务院加大力度淘汰钢铁、水泥、电解铝、汽车等产能过剩行业^[1],相关行业建筑物和构筑物在新建、改建、修缮、拆毁过程中将产生大量的受污染建筑垃圾^[2-3]。其中包含受汞污染建筑废物,汞既能以气态单质汞存在于大气中,亦能随大气迁移,沉降到生态环境^[4],污染地下水、地表水、土壤和空气^[5-10],进而被生物富集或转化为剧毒的甲基汞^[6],甚至危害人类健康^[11-12]。因此化工、冶金等汞污染严重的行业需要选择合适的抗污染建筑材料,并在拆除过程中做好污染控制工作。然而关于建筑材料^[13]的已有研究主要集中在力学性质^[14]、环保节能^[15]、相变储能技术^[16]、保温^[17]、全生命周期评价^[18]、再生利用技术^[19-24],关于建筑材料对汞的吸附或暴露研究尚未见到报道。本文研究了5种不同建筑材料对汞的吸附特征,以及标准水泥混凝土块对汞的暴露情况。以为高污染行业建筑材料的选择及拆除后建筑垃圾的汞污染控制提供基本参考依据。

1 材料与方 法

1.1 样品采集及制备

1.1.1 5种不同类型建筑材料的制备 选取的5种不同商用建筑材料分别为水泥砖、泡沫混凝土、红砖、浦东再生砂石、都江堰再生骨料,分别制备成3种不同粒径(①100~10目、②200~100目、③<200目)置于汞平均浓度为200 ng/m³的恒温室内,分别在5、10、20、150 d测试汞含量。其中水泥砖主要组成为石粉60%,石硝3%,水泥8%~10%,生石灰3%,灰粉0.2%;泡沫混凝土主要组成为水泥55%~65%,煤灰34%~45%,发泡剂0.2%~0.6%,添加剂0.2%~0.5%;红砖主要组成为粘土80%,煤矸石6%~12%,粉煤灰8%~14%;砂石为指砂粒和碎石的松散混合物;骨料为在混凝土中起骨架或填充作用的粒状松散材料,分粗骨料和细骨料,包括碎石、细砂、废渣等。

1.1.2 水泥混凝土标准试块的制备 制作强度为C15的水泥混凝土立方体标准试块(边长为150 mm的立方体),在(20±2)°C的温度和相对湿度在95%以上的潮湿空气中养护28 d。置于汞浓度为200 ng/m³的恒温室内吸附1.5 a后测试汞的侵入深度。

1.1.3 样品制备 最终样品均自然风干并粉碎至

<0.15 mm(100目)。

1.1.4 气态汞发生源 利用汞渗透管作为气态汞发生源,在恒温室内以25°C和恒定流量载气(纯N₂)的条件下形成浓度稳定到200 ng/m³的气态汞。具体用RA-915M便携式气态汞分析器进行监测。

1.2 样品分析及数据处理

1.2.1 仪器及试剂 仪器:DMA-80直接汞分析仪(意大利Milestone Srl.公司);RA-915M便携式气态汞分析器(俄罗斯LUMEX分析仪器公司);XRD:D8 Advance X射线衍射仪(德国Bruker公司);XRF:AXIOSmAX-X射线荧光光谱仪(荷兰PANalytical分析仪器公司);Mastersizer 3000(MS3000)激光粒度分析仪(英国马尔文仪器有限公司);扫描电子显微镜(Quanta 200 FEG, FEI Company, 美国);Millipore Milli-Q Academic型超纯水仪。

汞标准储备溶液1 000 mg/L;汞渗透管(美国VICI Metronics公司);氧气纯度为99.999%;试验用水为超纯水。

1.2.2 数据处理 文中数据于EXCEL 2007中进行整理,用Originpro 9.1进行作图。

2 结果与讨论

2.1 选取5种建筑材料对汞进行吸附模拟研究

2.1.1 XRD分析 图1给出了水泥砖、泡沫混凝土、红砖、浦东再生砂石、都江堰再生骨料的XRD扫描谱图。由图可知,水泥砖主要由二氧化硅(Quartz, Silicon Oxide, SiO₂),碳酸钙(Calcite, CaCO₃)等矿物组成;泡沫混凝土主要由硅酸钡(Barium Silicate, BaSiO₃),碳酸钙(Calcite, CaCO₃),莫来石(Mullite, 3Al₂O₃·2SiO₂)等矿物组成;红砖主要由二氧化硅(Quartz, Silicon Oxide, SiO₂)组成;浦东再生砂石主要由二氧化硅(Quartz, Silicon Oxide, SiO₂),碳酸钙(Calcite, CaCO₃),碳酸镁(Magnesium calcite, MgCO₃)等矿物组成;都江堰再生骨料主要由二氧化硅(Quartz, Silicon Oxide, SiO₂),碳酸钙(Calcite, CaCO₃),硅酸铝钠(Sodium Aluminum Silicate, Na₆Al₆Si₁₀O₃₂)等组成。5种建筑材料矿物成分均以二氧化硅为主,碳酸钙次之。

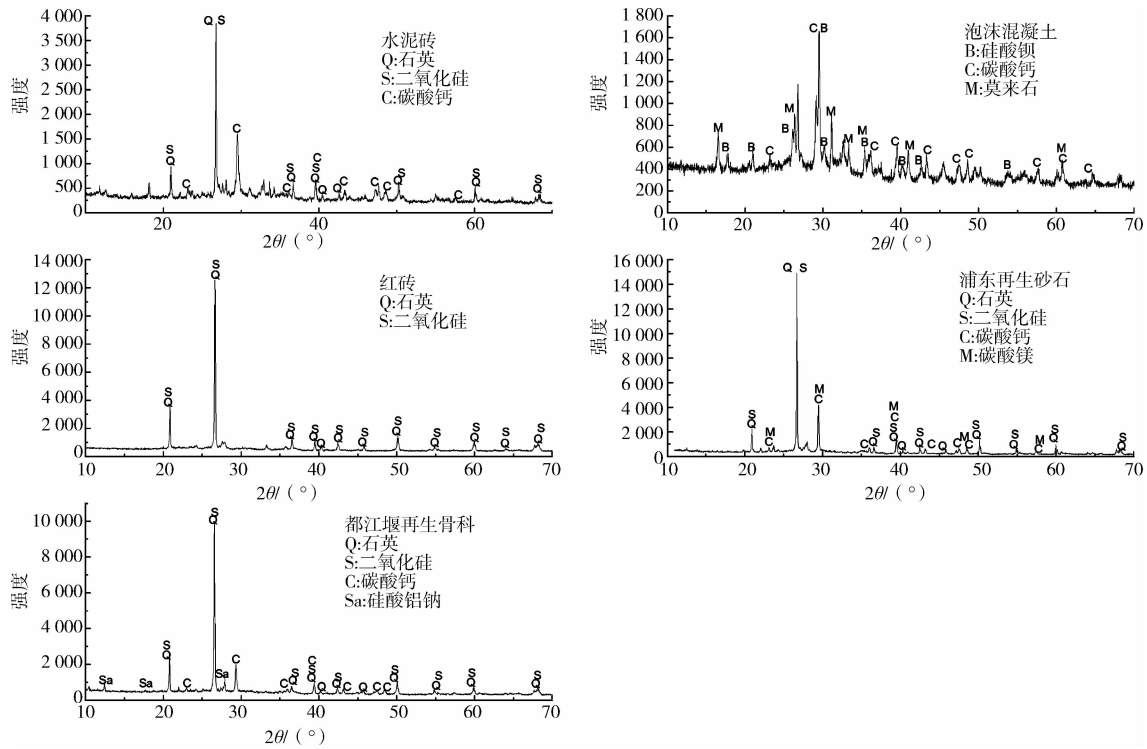


图 1 5 种建筑材料的 XRD 谱图

2.1.2 XRF 分析 表 1 给出了水泥砖、泡沫混凝土、红砖、都江堰再生骨料、浦东再生砂石的 XRF 分析数据,水泥砖主要以 SiO_2 (34.869%) 和 CaO (26.247%) 为主;泡沫混凝土以 SiO_2 (37.363%)、

CaO (20.033%)、 Al_2O_3 (15.565%) 为主;红砖以 SiO_2 (66.919%) 和 Al_2O_3 (14.263%) 为主;都江堰再生骨料与浦东再生砂石均主要以 SiO_2 和 CaO 为主。可见 5 种建筑材料均以 SiO_2 作为主成分。

表 1 建筑材料的主要矿物成分

样品	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	K_2O	Na_2O
水泥砖	34.869	7.222	2.982	1.989	26.247	1.471	0.761
泡沫混凝土	37.363	15.565	4.003	0.996	20.033	1.269	0.441
红砖	66.919	14.263	5.842	1.115	1.884	1.909	1.385
都江堰再生骨料	48.452	11.707	5.492	1.921	12.495	2.091	0.865
浦东再生砂石	50.121	10.348	4.338	1.33	15.553	2.009	1.204

2.1.3 SEM 分析

图 2 给出了水泥砖、泡沫混凝土、红砖、都江堰再生骨料、浦东再生砂石的 SEM 图,从扫描电镜图可见孔隙率红砖>砂石>泡沫混凝土>骨料>水泥砖。空隙率越大可能对汞的吸附能力越强。

2.1.4 模拟粒度分析

表 2 中 5 种建筑材料粒径分布以 D_{v10} , D_{v50} , D_{v90} 表示^[25]。平均粒径分布,首先 100~10 目 90%分布在 1 117.4 μm 以下,50%分布在 476 μm 以下;200~100 目 90%分布在 194.4 μm ,50%分布在 89.76 μm ; <200 目 90%分布在 68.54 μm ,50%分布在 31.76 μm 。由于 RSD 均在 10% 以内,5 种

材料 3 种粒径均匀分布。故选取红砖作为代表性材料,进行粒度分级展示(图 3)。

表 2 5 种建筑材料的平均粒度

粒径	D_{v10}	D_{v50}	D_{v90}
①100~10 目	211±12.06	476±26.66	1 117.4±96.54
②200~100 目	23.64±2.69	89.76±4.3	194.4±11.36
③<200 目	8.24±0.99	31.76±3.91	68.54±4.76

2.1.5 不同建筑材料对气态汞吸附分析 5 种建筑材料汞含量的本底值分别为:水泥砖(10 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、泡沫混凝土(80 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、红砖(12 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、都江堰再生骨料(15 $\mu\text{g}/\text{kg}$)、浦东再生砂石(20 $\mu\text{g}/\text{kg}$),详见图 4-a。

恒温室内汞浓度保持在 200 ng/m^3 左右(RA-915M 便携式气态汞分析器进行定期监测), 样品分别在 5、10、20、150 d 检测汞含量。3 种粒径①10~100 目、②100~200 目、③<200 目, 后文均以①、②、③简称。

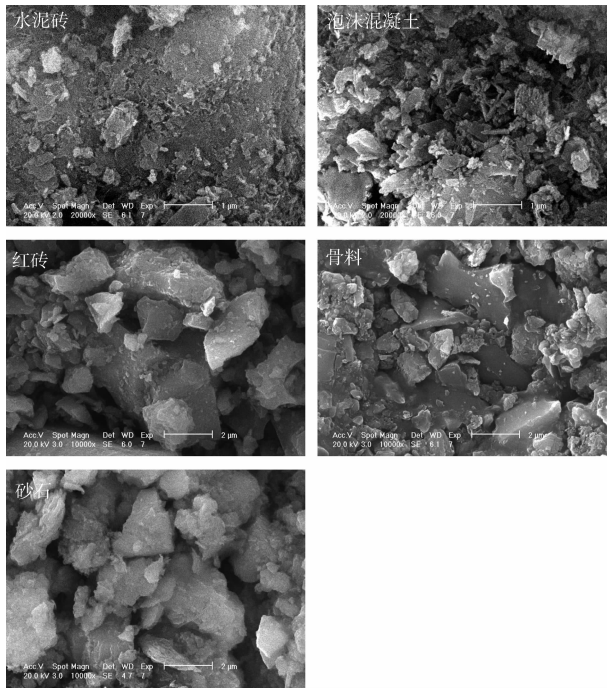


图2 5种建筑材料的SEM图

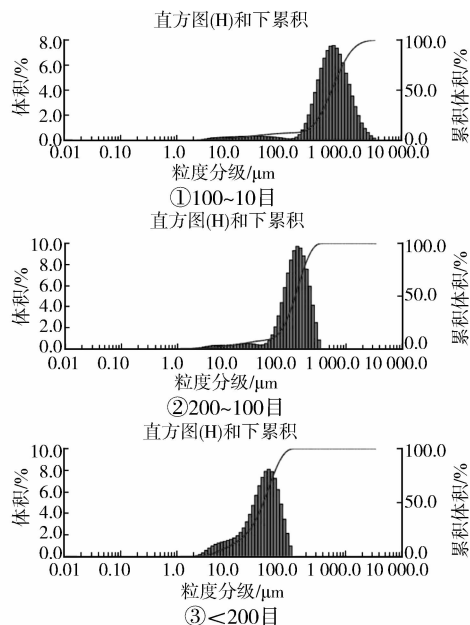


图3 以红砖细粉为代表的粒度分布

水泥砖吸附 5 d 后测得①、②、③3 种粒径汞含量分别为 10.93 、 41.05 、 $61.88 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 可看出粒径越小吸附量越大。吸附 10、20 d 后汞含量均逐渐增大, 在 150 d 后测得 3 种粒径样品中汞含量分别为 50.04 、

173.77 、 $168.14 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。相比其本底值 $10 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 吸附量分别为 40 、 160 、 $158 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。②吸附量反而略大于③, 可能是由于两者吸附量均已达到饱和, 可以推断出在 150 d 后水泥砖细粉 100 目以下均会受到污染^[26]。

泡沫混凝土吸附 5 d 后测得①、②、③3 种粒径汞含量分别为 83.66 、 102.57 、 $102.60 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 整体粒径越小吸附量越大, 但粒径②和③吸附量差别很小, 在吸附 10 d 和 20 d 后虽然均有增大, 但三者吸附量差别很小。直到 150 d 后 3 种粒径吸附量分别为 252.39 、 274.20 、 $320.78 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 相比本底值 $80 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 吸附量分别为 172 、 194 、 $240 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。三者差别很小, 整体趋势还是粒径越小吸附量越大。

红砖吸附 5 d 后测得①、②、③3 种粒径汞含量分别为 15.41 、 33.81 、 $497.22 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 粒径③吸附远远高于②、①。粒径①和②吸附 10、20 d 以后吸附量仍很低, 吸附 150 d 以后吸附量分别为 95.22 、 140.37 、 $1123.57 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。粒径①、②吸附量仍然远远低于粒径③。相比本底值 $12 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 吸附量分别为 83 、 128 、 $1112 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 粒径③是粒径②的近 10 倍, 是粒径①的 13 倍, 可见红砖 200 目以下的细粉极易受到汞污染。

都江堰再生骨料吸附 5 d 后测得①、②、③3 种粒径汞含量分别为 19.37 、 45.17 、 $77.58 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 粒径越小吸附量越大。吸附 10 d、20 d 后粒径①和②吸附量均变化很小。吸附 150 d 后汞含量分别为 139.99 、 173.35 、 $198.91 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。相比本底值 $15 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 吸附量分别为 125 、 158 、 $184 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 三者差别不大, 可见对于再生骨料, 粒径大小对汞吸附性影响不大^[27]。

浦东再生砂石吸附 5 d 后测得①、②、③3 种粒径汞含量分别为 23.06 、 41.00 、 $54.19 \text{ } \mu\text{g/kg}$ 。吸附 10 d、20 d 后吸附量均有所增加, 但增幅很小。吸附 150 d 后汞含量分别为 88.13 、 318.75 、 $629.12 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 相比本底值 $20 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 吸附量分别为 68 、 299 、 $609 \text{ } \mu\text{g/kg}$, 粒径越小吸附量越大, 且粒径③吸附量是②的近 2 倍, ①的近 10 倍。

图 4(b) 对吸附 150 d 的 5 种建筑材料汞含量进行对比, 可看出整体上粒径越小吸附量越大, 但不同材料之间存在差异性, 粒径①含量最大的是泡沫混凝土, 粒径②含量最大的是浦东再生砂石, 粒径③含量最大的是红砖。粒径③中红砖汞含量与其他几种材料相比, 其含量是水泥砖的 6.7 倍、泡沫混凝土的 3.5 倍、都江堰再生骨料的 5.7 倍、浦东再生砂石的 1.8 倍, 可见红砖是最容易受污染的建筑材料。吸

附 150 d 后,5 种材料汞含量与土壤 GB 15168—1995 标准二级标准阈值相比较,粒径②中浦东再生砂石超过阈值,粒径③中泡沫混凝土、红砖、浦东再生砂石均超过阈值。建筑物在拆迁改建过程中会产

生建筑废物细粉,其中泡沫混凝土、红砖和砂石可能受到汞污染。这与扫描电镜孔隙率的结论一致,不同建筑材料的表面结构不同,其对汞的吸附效果也不同。

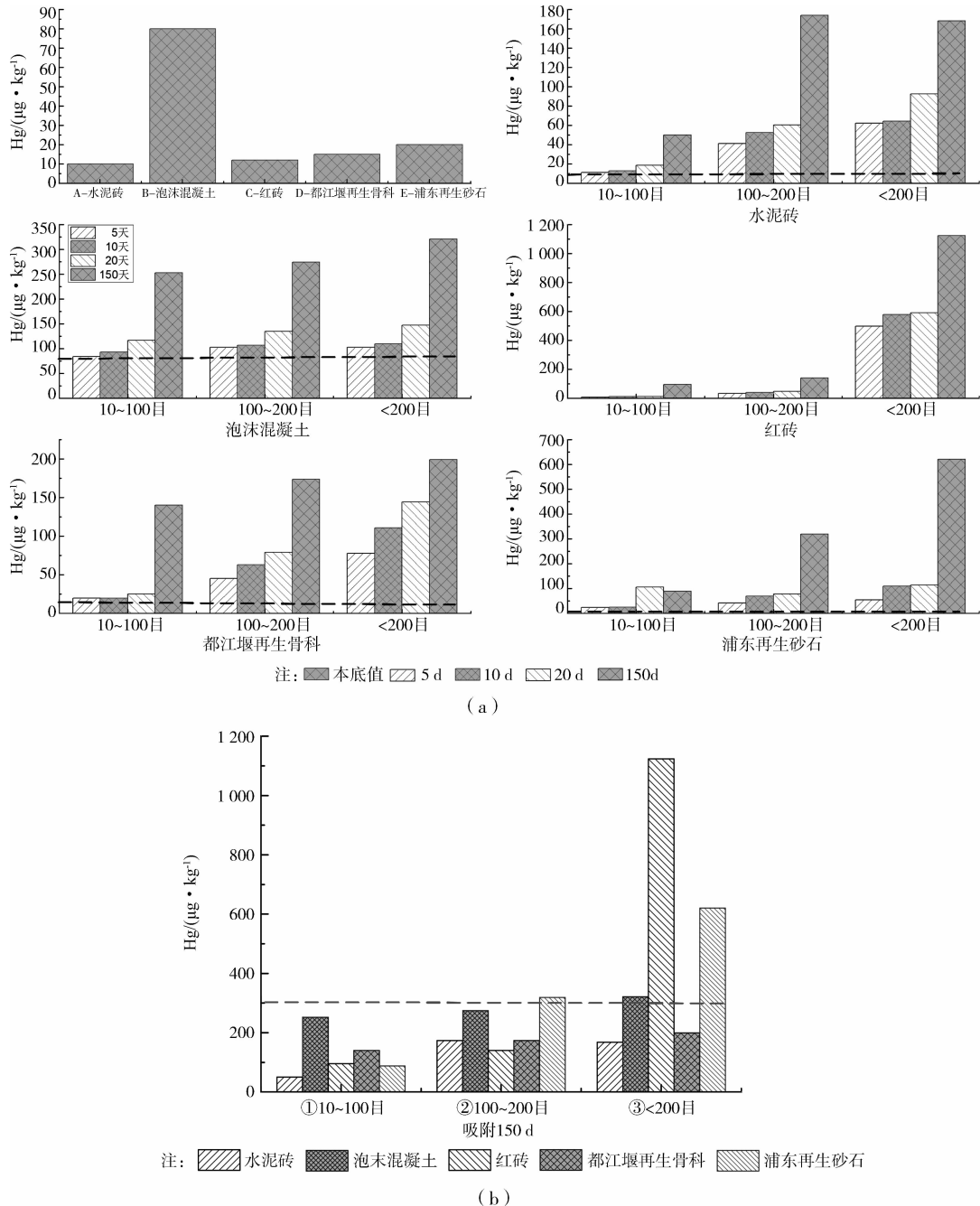


图 4 不同建筑材料对气态汞的吸附模拟研究

“—”表示各种建筑材料本底值,“- -”表示土壤 GB 15168—1995 标准二级标准阈值。

2.2 水泥混凝土立方体标准试块模拟吸附研究

强度为 C15 的水泥混凝土标准试块,制成边长为 15 cm 的立方体块,置于汞浓度为 $200 \text{ ng}/\text{m}^3$ 恒温室内暴露 1.5 a(RA-915M 便携式气态汞分析器进行定期监测),其汞的侵入深度剖面见图 5。水泥混凝土块初始汞含量为 $39 \pm 12 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg}$,可能由于其水泥混凝土

原料搅拌过程中汞含量分布不均,故存在一定的波动^[28]。从图中可看出水泥混凝土标准试块对汞的吸附在 0~0.5 cm 范围达到 $1\ 020.21 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg}$,0.5~1.0 cm 急剧下降为 $377.40 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg}$,可见汞污染主要集中在 0~0.5 cm 范围内。1.0~1.5 cm 为 $174.79 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg}$,1.5~2 cm 为 $55.02 \text{ } \mu\text{g}/\text{kg}^{-1}$ 。结果表明,汞污染集

中在 0.5~1.5 cm 范围内,此范围内汞含量远高于初始含量($39 \pm 12 \mu\text{g}/\text{kg}$)。因此当水泥混凝土服役结束之后,特别在汞污染严重的工厂^[29]、车间等拆迁、改建过程中,需对其表层进行剥离,去除汞污染。

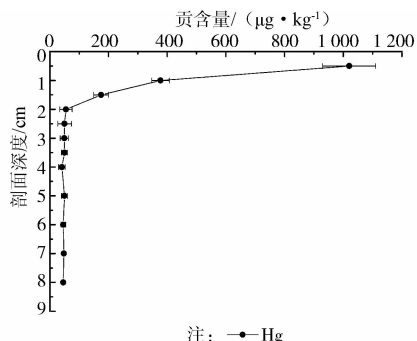


图5 水泥混凝土立方体标准试块中汞的剖面分布

3 结论

1)通过 XRD 和 XRF 对水泥砖、泡沫混凝土、红砖、砂石、骨料分析,结果表明 5 种建筑材料以二氧化硅为主,其次是碳酸钙。

2)通过 SEM 对 5 种建筑材料分析,图像表明孔隙率为红砖>砂石>泡沫混凝土>骨料>水泥砖。

3)对 5 种建筑材料的汞吸附模拟实验表明,整体上粒径越小吸附量越大,但不同材料之间存在差异性,红砖是最容易受污染的建筑材料,其次泡沫混凝土和砂石对汞也有较大吸附能力。这与 SEM 图像孔隙率一致,表明不同建筑材料表面结构影响其汞吸附能力。

4)水泥混凝土立方体标准试块汞吸附模拟实验表明主要污染存在于表层 0~1.5 cm 范围内,在汞污染严重的工厂和车间等在拆迁、改建过程中,可对其表层剥离,去除汞污染。

参考文献:

[1] 李新创,刘涛. 以应对雾霾为契机、切实提升钢铁工业环保水平[J]. 冶金经济与管理,2013(3):4-8.
Li X C, Liu T. In response to haze as an opportunity to enhance the steel industry environmental level [J]. Metallurgical economics and management, 2013, (03): 4-8.

[2] 高冬云. 城市建筑垃圾回收再利用浅析[J]. 黑龙江科技信息,2011(19):73.
Gao D Y. Urban construction waste recycling analysis [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2011(19):73.

[3] Prieto T N, Ibarrondo I, Gómez L O, et al. Buildings as repositories of hazardous pollutants of anthropogenic

origin [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013, 248/249:451-460.

- [4] 仇广乐. 贵州省典型汞矿区汞的环境地球化学研究[D]. 北京:中国科学院研究生院(地球化学研究所), 2005.
- [5] 袁志平. 城市建筑垃圾再利用对策研究[J]. 黑龙江交通科技, 2011(5):107-108.
Yuan Z P. Urban construction waste recycling Countermeasures [J]. communications Science and Technology Heilongjiang, 2011(5):107-108.
- [6] 李强,张瑞卿,郭飞,等. 贵州重点地区土壤和水体中汞的生态风险[J]. 生态学杂志, 2013(8):2140-2147.
Li Q, Zhang R Q, Guo F, et al. Ecological risk assessment of mercury in soils and waters in Guizhou Province of south-west China [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013(8):2140-2147.
- [7] Roussat N, Méhu J, Abdelghafour M, et al. Leaching behaviour of hazardous demolition waste [J]. Waste Management, 2008, 28(11):2032-2040.
- [8] Townsend T, Tolaymat T, Leo K, et al. Heavy metals in recovered fines from construction and demolition debris recycling facilities in Florida [J]. Science of the Total Environment, 2004, 332(1/2/3):1-11.
- [9] Weber W, Jang Y, Townsend T, et al. Leachate from land disposed residential construction waste [J]. Journal of Environmental Engineering, 2002, 128(3): 237-245.
- [10] Galvín A P, Ayuso J, Jiménez J R, et al. Comparison of batch leaching tests and influence of pH on the release of metals from construction and demolition wastes [J]. Waste Management, 2012, 32(1):88-95.
- [11] Boening D W. Ecological effects, transport, and fate of mercury: a general review [J]. Chemosphere, 2000, 40(12):1335-1351.
- [12] 张晓平,朱延明. 西藏土壤中汞的含量及其地理分布[J]. 环境科学, 1994(4):27-30.
Zhang X P, Zhu Y M. Soil mercury content and geographic distribution in Tibet [J]. Environmental Science, 1994(4): 27-30.
- [13] Molina E, Cultrone G, Sebastian E, et al. The pore system of sedimentary rocks as a key factor in the durability of building materials [J]. Engineering Geology, 2011, 118(3/4):110-121.
- [14] 徐建军. 谈建筑材料的力学性质[J]. 黑龙江科技信息, 2012(6):272.
Xu J J. About the mechanical properties of building materials [J]. Heilongjiang Science and Technology Information, 2012(6):272.
- [15] 陆丽嫦. 环保节能型建筑材料的应用与发展分析[J].

- 中华民居:下旬刊,2014(1):17-19.
- Lu L C. Application and development of environmentally friendly energy-saving building materials analysis [J]. Chinese houses;Late publication,2014(1):17-19.
- [16] 张东,周剑敏,吴科如. 相变储能建筑材料的分析与研究[J]. 新型建筑材料,2003(9):42-44.
Zhang D, Zhou J M, Wu K R. Phase change energy storage building materials analysis and research [J]. New Building Materials,2003(9):42-44.
- [17] 王智宇,林旭添,陈锋,等. 相变储能保温建筑材料的制备及性能评价[J]. 新型建筑材料,2006(11):35-37.
Wang Z Y, Lin X T, Chen F, et al. Phase change thermal energy storage preparation and performance evaluation of building materials [J]. New Building Materials,2006(11):35-37.
- [18] 赵平. 生态环境与建筑材料[J]. 中国建材科技,2004(2):13-20.
Zhao P. Ecological environment and building materials [J]. China Building Materials Science and Technology, 2004(2):13-20.
- [19] 张娟,杨昌鸣. 废旧建筑材料的资源化再利用[J]. 建筑学报,2010(Sup1):109-111.
Zhang J, Yang C M. The recycling of bulding material resources in architecture [J]. Architecture Journal, 2010, (Sup1):109-111.
- [20] Tam V W Y, Tam C M. A review on the viable technology for construction waste recycling [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2006, 47 (3): 209-221.
- [21] Huang W L, Lin D H, Chang N B, et al. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2002, 37(1):23-37.
- [22] Schachermayer E, Lahner T, Brunner P H. Assessment of two different separation techniques for building wastes [J]. Waste Management and Research, 2000, 18 (1):16-24.
- [23] Zhao W, Leeftink R B, Rotter V S. Evaluation of the economic feasibility for the recycling of construction and demolition waste in China-the case of Chongqing [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54 (6): 377-389.
- [24] Galvín A P, Ayuso J, Agrela F, et al. Analysis of leaching procedures for environmental risk assessment of recycled aggregate use in unpaved roads [J]. Construction and Building Materials, 2013, 40: 1207-1214.
- [25] 丁志平,乔延江. 不同粒径黄连粉体的吸湿性实验研究 [J]. 中国实验方剂学杂志,2004(3):5-7.
Ding Z P, Qiao Y J. Study on hygroscopicity of different particle size of rhizoma coptidis [J]. Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae, 2004(3):5-7.
- [26] Kim B J, Bae K M, Park S J. A study of the optimum pore structure for mercury vapor adsorption [J]. Bulletin of the Korean Chemical Society, 2011, 32 (5): 1507-1510.
- [27] Baya P A, Hollinsworth J L, Hintelmann H. Evaluation and optimization of solid adsorbents for the sampling of gaseous methylated mercury species [J]. Analytica Chimica Acta, 2013, 786:61-69.
- [28] Koronthalyova O. Moisture storage capacity and microstructure of ceramic brick and autoclaved aerated concrete [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2):879-885.
- [29] Sun C G, Snape C E, Liu H. Development of low-cost functional adsorbents for control of mercury (Hg) emissions from coal combustion [J]. Energy & Fuels, 2013, 27(7):3875-3882.

(编辑 胡玲)