

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第12期

Vol.33 No.12

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

特别策划:再生水灌溉利用生态风险研究专题

序	陈卫平 (4069)
再生水灌溉利用的生态风险研究进展	陈卫平,张炜铃,潘能,焦文涛 (4070)
绿地再生水灌溉土壤微生物量碳及酶活性效应研究	潘能,侯振安,陈卫平,焦文涛,彭驰,刘文 (4081)
绿地再生水灌溉土壤盐度累积及风险分析	潘能,陈卫平,焦文涛,赵忠明,侯振安 (4088)
再生水灌溉对土壤性质及重金属垂直分布的影响	赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥 (4094)
模型模拟再生水灌溉对土壤水盐运动的影响	吕斯丹,陈卫平,王美娥 (4100)
模型模拟土壤性质和植被种类对再生水灌溉水盐运移的影响	吕斯丹,陈卫平,王美娥 (4108)
再生水灌溉农田土壤镉累积规律模拟研究	赵忠明,陈卫平,焦文涛,王美娥 (4115)
再生水灌溉土壤人工合成麝香累积模型模拟	王美娥,陈卫平,焦文涛 (4121)
城市绿化草坪再生水灌溉对地下水水质影响研究	王巧环,陈卫平,王效科,任玉芬,张烨 (4127)
北京市再生水的公众认知度评估	张炜铃,陈卫平,焦文涛 (4133)

研究报告

北京地区臭氧时空分布特征的飞机探测研究	陈鹏飞,张蕾,权建农,高扬,黄梦宇 (4141)
世博会期间上海市大气挥发性有机物排放强度及污染源研究	王红丽,陈长虹,黄海英,王倩,陈宜然,黄成,李莉,张钢锋,陈明华,楼晟荣,乔利平 (4151)
贡嘎山本底站大气中 VOCs 的研究	张军科,王跃思,吴方堃,孙杰 (4159)
区域大气环境风险源识别与危险性评估	张晓春,陈卫平,马春,詹水芬,焦文涛 (4167)
稻草烟尘中正构烷烃和正构脂肪酸的碳同位素	刘刚,孙丽娜,李久海,徐慧 (4173)
汽油轿车 NEDC 循环超细颗粒物排放特性	胡志远,李金,谭丕强,楼狄明 (4181)
城市道路绿化带不同植物叶片附尘对大气污染的磁学响应	隆茜,周菊珍,孟颖,达良俊 (4188)
闽江口养殖塘水-大气界面温室气体通量日进程特征	杨平,仝川,何清华,黄佳芳 (4194)
模拟增温对冬小麦-大豆轮作农田土壤呼吸的影响	刘艳,陈书涛,胡正华,任景全,沈小帅 (4205)
广西大石围天坑中多环芳烃的大气传输与分异	孔祥胜,祁士华,孙蓓,黄保健 (4212)
松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究	马万里,刘丽艳,齐虹,白杨,沈吉敏,陈忠林,李一凡 (4220)
温州城市河流中多环芳烃的污染特征及其来源	周婕成,陈振楼,毕春娟,吕金刚,许世远,潘琪 (4226)
温州城市河流河岸带土壤中 PAHs 的污染特征与来源	周婕成,毕春娟,陈振楼,王璐,许世远,潘琪 (4237)
辽河水系沉积物中 PAHs 的分布特征及风险评估	武江越,刘征涛,周俊丽,高富 (4244)
某炼油厂退役场地土壤与浅层地下水酚类污染特征研究	裴芳,罗泽娇,彭进进,祁士华 (4251)
某大型焦化企业污染场地中多环芳烃空间分布的分异性特征	刘庚,郭观林,南锋,魏文侠,李发生,毕如田 (4256)
太原市污灌区有机氯农药垂直分布特征及源解析	廖小平,张彩香,赵旭,向青清,李佳乐 (4263)
上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价	吕金刚,毕春娟,陈振楼,周婕成,韩景超 (4270)
近 50 年来深圳湾红树林湿地 Hg、Cu 累积及其生态危害评价	李瑞利,柴民伟,邱国玉,贺蓓 (4276)
北运河源头区沙河水库沉积物重金属污染特征研究	张伟,张洪,单保庆 (4284)
太湖表层沉积物重金属赋存形态分析及污染特征	秦延文,张雷,郑丙辉,曹伟 (4291)
典型季风型温冰川消融期融水化学日变化特征	朱国锋,蒲焘,何元庆,王培震,张建龙,张宁宁,辛惠娟 (4300)
螺-草水质净化系统氮素环境归趋的实验研究	周露洪,谷孝鸿,曾庆飞,毛志刚,高华梅,孙明波 (4307)
固定化果胶酶抑制铜绿微囊藻生长研究	沈清清,彭谦,赖泳红,纪开燕,韩秀林 (4316)
采用膜污染指数评估天然有机物在低压超滤膜中的污染行为	肖萍,肖峰,赵锦辉,秦潼,王东升,冯金荣,许光 (4322)
水体中甲基汞光化学降解特征研究	孙荣国,毛雯,马明,张成,王定勇 (4329)
土霉素在乙酸水溶液中的臭氧氧化降解研究	李时银,李小荣,朱怡苹,朱江鹏,王国祥 (4335)
酰胺咪唑光降解效能与机制及其影响因素研究	陈超,赵倩,封莉,张立秋 (4340)
利用 FeS 去除水中硝基苯的试验研究	王夏琳,李睿华 (4346)
地下污水管线泄漏原位自动监测模拟实验研究	郭磊,贾永刚,付腾飞,刘晓磊,赵战坤 (4352)
表面活性剂改性沸石对水中酚类化合物吸附性能研究	谢杰,王哲,吴德意,李春杰 (4361)
抗生素类制药废水厌氧消化产物急性毒性的检测	季军远,邢雅娟,郑平 (4367)
废砖块作为人工湿地填料的除磷能力研究	王振,刘超翔,李鹏宇,董健,刘琳,朱葛夫 (4373)
基于生物沸石复合滤料的间歇式脱氮水处理	庆承松,鲍韬,陈天虎,陈冬,谢晶晶 (4380)
硝酸盐对厌氧生物膜和颗粒污泥的同时产甲烷反硝化性能影响研究	钟晨宇,叶杰旭,李若愚,陈胜,孙德智 (4387)
水平电场作用下活性污泥的脱水研究	季雪元,王毅力,冯晶 (4393)
多重环境因子对氟胺磺隆在土壤中降解的影响	宋宁慧,单正军,石利利,郭敏,许静,孔德洋 (4400)
碱后处理对互花米草沼渣理化特性的影响研究	陈广银,郑正,常志州,王海芹,叶小梅 (4406)
含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为	王兴润,农泽喜,王琪 (4412)
国家大气污染物排放标准体系研究	江梅,张国宁,张明慧,邹兰,魏玉霞,任春 (4417)
环境基准向环境标准转化的机制探讨	毕岑岑,王铁宇,吕永龙 (4422)
对“有毒重金属”实施 2 种总量控制监管方式的利害分析	傅国伟 (4428)
《环境科学》第 33 卷(2012 年)总目录	(4434)
《环境科学》征订启事(4099)	
《环境科学》征稿简则(4166)	
信息(4180, 4219, 4225, 4275)	
专辑征稿通知(4172)	

含砷废渣高温烧结过程砷的矿物相结构变化与环境释放行为

王兴润¹, 农泽喜^{1,2}, 王琪¹

(1. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院, 北京 100083)

摘要: 研究了含砷废渣高温烧结过程引起的砷挥发和砷发生的矿物相结构变化, 并分析了烧结体的砷浸出释放行为。在 10 MPa 下加压成型制样, 进空气流量为 2 000 mL·min⁻¹, 烧结温度 1 000 ~ 1 350℃, 烧结时间 60 min。结果表明, 烧结温度对砷挥发的影响很小, As 的固定率保持在 90% 以上, 但对砷浸出毒性的影响明显。烧结温度低于 1 000℃ 时, FeAsS 被氧化生成钙砷、铝砷和铁砷, 以 Ca₃(AsO₄)₂ 矿物相为主, 导致砷的浸出释放水平提高; 烧结温度达到 1 200℃, Ca₃(AsO₄)₂ 被玻璃熔融态所包围, 并被转换为硅钙砷酸盐化学键接, 导致砷的浸出水平显著降低。从烧结体的环境安全性考虑, 最佳烧结温度为 1 200℃。

关键词: 含砷废渣; 烧结; 浸出毒性; 矿物相; 微观结构

中图分类号: X705 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)12-4412-05

Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste

WANG Xing-run¹, NONG Ze-xi^{1,2}, WANG Qi¹

(1. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: An experimental work was carried out to investigate the effect of sintering temperature on arsenic volatility, arsenic leaching of the sinter and structural changes in mineral phases of arsenic in the sinter. The raw materials were shaped under the pressure of 10 MPa and sintered at 1 000-1 350℃ for 60 min with the air flow rate of 2 000 mL·min⁻¹. The results showed that there was little impact between the volatilization of arsenic before and after sintering, and arsenic fixed-rate remained above 90%, however, the sintering temperature had an important influence on the leaching concentration of arsenic. When sintering temperature was lower than 1 000℃, FeAsS was oxidized into calcium arsenate, aluminum arsenate, and iron-arsenate. Ca₃(AsO₄)₂ was the main compound, and the release of arsenic leaching was high. When sintering temperature was up to 1 200℃, the arsenic was surrounded by a glass matrix and became chemically bonded inside the matrix. Arsenates can be converted into silicoarsenates during sintering, which led to the leaching of arsenic was significantly lower. Considering the product's environmental safety, the best sintering temperature was 1 200℃.

Key words: arsenic-containing waste; sintering; toxic leaching; mineral phase; microstructure

砷是一种毒性非常强的环境污染物,它是对人体和其他生物体具有很强毒害作用的致癌物质^[1,2]。硫的铁、金、银、汞、铜、铅和锌矿中常常伴生含砷矿物^[3]。我国每年共约有 3 万 t 的砷进入有色金属冶炼厂,绝大部分最终还是以废渣形式就地堆存,构成了我国最主要的含砷废物^[4-6]。含砷废渣的简单堆放已经造成了部分地区的砷污染,如河南大沙河砷污染事件、云阳宗海砷污染事件。因此,如何安全处置含砷废渣,使之达到稳定化、无害化和资源化,已成为当前亟待解决的问题。

含砷废渣处理处置技术研究较多的有水泥、垃圾焚烧飞灰等材料处置含砷废渣的固化/稳定化技术^[7-10],但固化/稳定化之后的废物出路是一个亟

待解决的难题。烧结轻骨料技术具有处理处置危险废物同时节约黏土资源的双重作用。目前,国内对于污泥^[11-14]、焚烧飞灰^[15-17]的烧结技术处理处置研究较多,但是尚无含砷废渣烧结轻骨料方面的研究。本试验以黏土和粉煤灰作为辅助原料,对含砷冶炼废渣进行高温烧结处理,探讨高温烧结过程 As 的矿物相结构变化和浸出释放行为,以为含砷废渣烧制轻骨料的资源化研究提供科学依据。

收稿日期: 2012-02-10; 修订日期: 2012-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目(21107102)

作者简介: 王兴润(1981~),男,博士,副研究员,主要研究方向为固废处理处置技术, E-mail: xingrunwang@gmail.com

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用的含砷冶炼废渣为河南某化工厂采用含砷硫铁矿高温烧结生产硫酸后的剩余废渣,辅助原料为黏土和取自北京某水泥厂的粉煤灰(见表

1)。含砷废渣主要的粒径分布为 20 目 $< x < 100$ 目占 41.71%, $x > 100$ 目占 46.19%。砷的含量为 $13\,326\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 毒性浸出浓度为 $8.35\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 超过了文献[18]的标准值($5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。

试验所用原材料均经研磨后通过 10 目的分样筛。

表 1 试验材料

Table 1 Experimental materials

材料	含水率 /%	质量密度 / $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	600℃ 烧失量 /%	所占质量分数/%						
				SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	As ₂ O ₃
含砷废渣	0.93	1 524 ~ 1 772	1.03	10.10	3.16	69.78	4.97	1.95	0.52	2.72
黏土	0.86	1 346 ~ 1 374	3.14	57.60	14.65	6.59	11.47	2.32	4.23	—
粉煤灰	0.08	844 ~ 853	1.77	46.83	38.86	4.66	4.65	0.49	1.08	—

1.2 试验方法

1.2.1 混料与造粒

按照烧结轻骨料所需的 Ca、Si、Al、Fe 等原料组成成分要求^[19] 配比含砷冶炼废渣、黏土和粉煤灰,添加质量比例为 1:16:3。样品混匀后使用台式粉末压片机压片成型。成型压强为 10 MPa,保压 1 min,得到 $\phi 10\text{ mm}$ 的圆柱型试体,每试片体重约 2 g。

1.2.2 高温烧结

使用高温管式电阻炉 (SKZ 46 (16)-XYL,西安云汉高温炉业有限公司) 在 $2\,000\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 的空气流量下对试体进行恒温烧结 60 min,烧结温度选取 1 000、1 050、1 100、1 200、1 300、1 350℃,试体取出后,在空气中自然冷却而形成坚硬致密的烧结体。

1.2.3 分析方法

烧结体经过粉碎、研磨过 100 目分样筛后,采用微波辅助消解法对样品进行消解。称取约 0.1 g 样品置于消解罐中,加入 10 mL HNO₃ (优级纯),放入消解仪 (Xpress, 美国培安科技公司) 进行消解。消解升温程序为:在 10 min 内从室温升至 165℃,保持 2 min 后,在 5 min 内升至 175℃,保持 15 min 后自然冷却。消解完成后将消解液转移至容量瓶中定容,经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤后待测。

烧结体中砷的浸出特性采用水平振荡法^[20] 和 TCLP 方法^[21] 分析,水平振荡法使用的浸提剂是去离子水,TCLP 方法经测试使用的是 1 号浸提剂,即 pH 为 4.93 的 CH₃COOH/NaOH 混合溶液。浸出溶液经过 0.45 μm 微孔滤膜过滤。

消解液和浸出液在进行一定程度的稀释后,用电感耦合等离子体质谱仪 (7500Cs, 安捷伦科技有限公司) 进行测定。通过平行试验样品的测定结果、同一样品重复测定的 RSD 及加标回收率进行质量

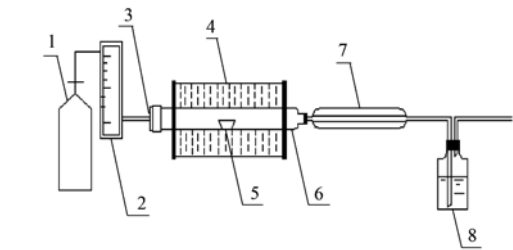
控制。

烧结前后样品中的无机矿物形态结构采用 X 射线衍射仪 (Rigaku D/max-RB 型) 进行检测。

烧结体的微观结构观察采用扫描电子显微镜 (SEM) 对烧结体的表面形貌特征进行直观的分析,本试验使用的 SEM 是科仪 KYKY2000 型,二次电子像点分辨率为 6 nm,放大倍数 15 ~ 100 000 倍。

1.3 试验装置

烧结装置结构见图 1。将样品放在刚玉坩埚中,推入高温刚玉炉膛进行烧结。



1. 储气瓶; 2. 流量计; 3. 进气孔; 4. 高温管式电阻炉;
5. 刚玉坩埚; 6. 高温刚玉炉膛; 7. 冷凝管; 8. 尾气吸收液

图 1 烧结装置结构示意图

Fig. 1 Structure of sintering device

2 结果与讨论

2.1 烧结温度对 As 总量及固定率的影响

图 2 和图 3 是不同烧结温度下烧结体中 As 的总量和固化率 (温度为 0℃ 表示未烧结样品)。由图 2 可以看出,不同温度烧结后烧结体中 As 的总量 (12.64 ~ 13.46 mg) 与烧结前总量 (13.65 mg) 相比略有降低。图 3 显示,不同烧结温度下烧结体中 As 的固定率均保持在一个较高的水平 (92.58% ~ 98.62%), 由此可见,烧结过程中 As 的挥发率很低。 >90% 以上的 As 被固定在烧结体中。

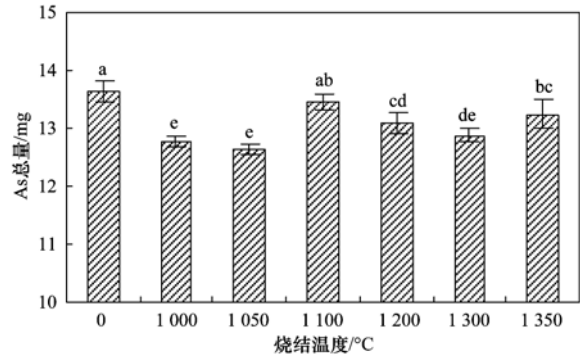


图2 烧结温度对烧结体中As总量的影响
Fig. 2 Effect of sintering temperature on the total amount of As in sintered body

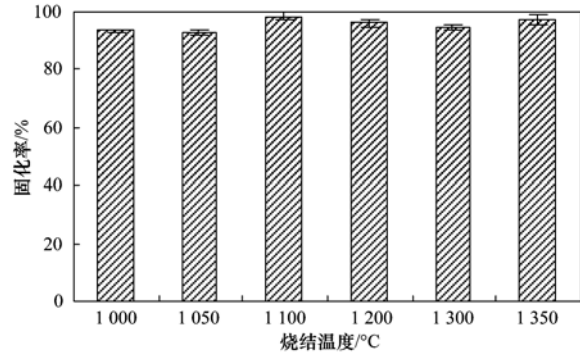


图3 不同烧结温度下烧结体中As固化率
Fig. 3 Stabilization ratios of As in sintered body at different sintering temperatures

2.2 烧结温度对烧结体As浸出的影响

浸出毒性试验是考察重金属环境迁移特性最常用的方法^[22-24]。本试验采用水平振荡法和 TCLP 法来考察烧结体中砷的浸出特性。

表2为不同烧结温度下烧结体中As的浸出浓度。可以看出,在水平振荡法浸出试验中,烧结温度升高到1000℃时,烧结体的浸出水平显著上升,从0.568 mg·L⁻¹升至0.962 mg·L⁻¹,烧结温度继续上升至1200℃时,烧结体As的浸出浓度显著降至0.002 mg·L⁻¹。TCLP浸出试验表明,在室温~1000℃,烧结体中As的浸出浓度变化不大;1000~1200℃,烧结体中As的浸出浓度呈下降趋势,1200℃时达到最低,为0.567 mg·L⁻¹;烧结温度>1300℃,As的浸出浓度反而增大,1350℃时达到2.948 mg·L⁻¹。

图4为不同烧结温度下烧结体中As的浸出率。可以看出,水平振荡法浸出试验中,烧结体中As的浸出率随着烧结温度的升高而降低,烧结温度高于1200℃时,浸出率<0.003%。烧结温度低于

1050℃时,As的浸出率反而比烧结前(0.83%)大。TCLP浸出分析中,烧结温度为1200℃时,砷的浸出率最低,为1.79%,而烧结温度在1000℃和1350℃时,砷的浸出率反而比烧结前(4.83%)大。

表2 不同烧结温度下As的浸出浓度/(mg·L⁻¹)

Table 2 As leaching concentration of sintered body at different sintering temperatures/(mg·L⁻¹)

烧结温度/℃	水平振荡法	TCLP
0 ¹⁾	0.568	1.616
1000	0.962	1.522
1050	0.703	0.904
1100	0.315	0.637
1200	0.002	0.567
1300	0.001	1.249
1350	0.001	2.948

1)未烧结样

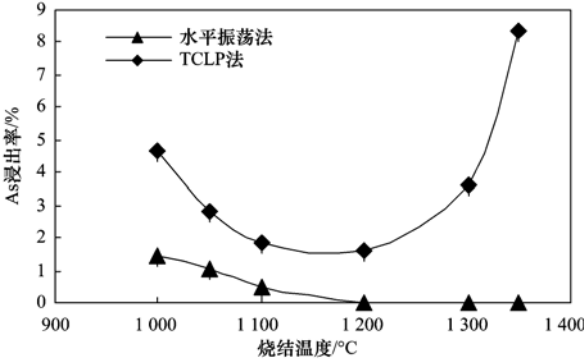
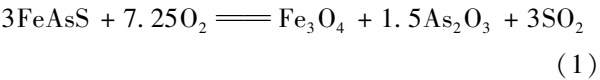


图4 不同烧结温度下烧结体中As的浸出率
Fig. 4 Leaching ratios of As in sintered body at different sintering temperatures

2.3 不同烧结温度下砷矿物相结构的变化

不同烧结温度下烧结体中的矿物相结构如图5所示。

比较烧结前和1000℃烧结后的矿物相结果可以发现,烧结后FeAsS矿物相消失,Ca₃(AsO₄)₂矿物相峰增强。FeAsS在加热过程中发生如下反应的吉布斯自由能的计算结果如表3所示,吉布斯自由能-7086~-8378 kJ,远小于0,反应自发进行。由此可推知FeAsS在加热到1000℃的过程中发生了如式(1)化学反应,导致FeAsS物质的消失,生成了As₂O₃。反应生成的As₂O₃与钙、铁、铝能够自发发生式(2)~(4)的反应,当温度<1200℃时,反应难易顺序为:CaO>Al₂O₃>Fe₃O₄,因此,温度<1200℃时反应生成Ca₃(AsO₄)₂,导致矿物相峰增强。



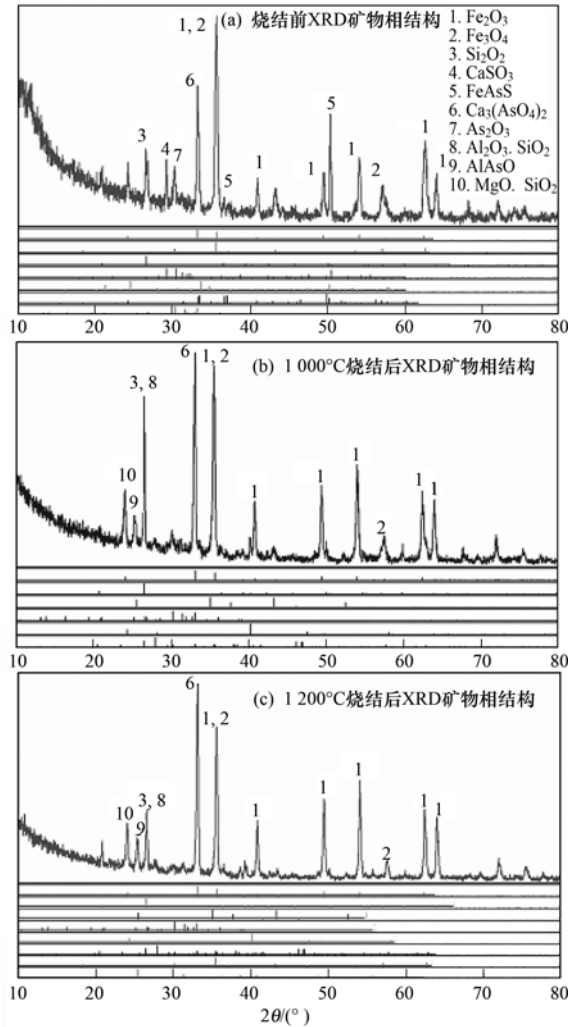
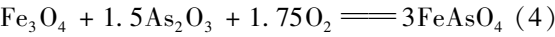
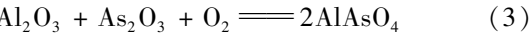
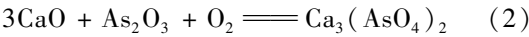


图5 不同烧结温度下烧结体中As的矿物相

Fig. 5 Mineral phase of As in sintered body at different sintering temperatures

砷酸铁是一种自然矿物,难溶于水. 砷酸钙微溶于水,砷酸钙在不同 pH 值水中溶解度为 0.01 ~ 126 mg·L⁻¹^[25],因此,烧结温度从室温升至1 000℃过程中,砷的浸出浓度增大.

表3 不同烧结温度下的吉布斯自由能

Table 3 ΔG at different sintering temperatures

t/℃	吉布斯自由能 G/kJ			
	式(1)	式(2)	式(3)	式(4)
600	-8 377.85	-540.265	-448.472	-300.249
800	-8 023.93	-487.221	-422.807	-241.061
1 000	-7 659.06	-433.884	-397.058	-181.746
1 100	-7 471.67	-407.216	-384.351	-152.361
1 200	-7 280.81	-380.589	-371.769	-123.226
1 300	-7 086.4	-354.046	-359.355	-94.426 2

2.4 不同烧结温度下烧结体形貌变化

不同烧结温度下烧结体的外观形貌变化如图 6 所示. 未烧结时样品明显显示出颗粒的松散堆积状态; 1 000℃时,样品开始出现熔融态; 1 200℃时,烧结体出现明显的熔融态,产生了少量液相,液相的作用使晶粒间互相黏结, Ca₃(AsO₄)₂ 被玻璃熔融态所包围,并被转换为硅钙砷酸盐化学链接,导致砷的浸出水平显著降低.

3 结论

(1)含砷冶炼废渣在高温烧结过程中砷挥发较少,烧结温度1 000 ~ 1 300℃时,砷的固定率均保持在 90% 以上.

(2)烧结温度对烧结体中砷的浸出特性具有显著的影响. 水平振荡浸出试验结果表明,烧结温度越高,烧结体中砷的浸出浓度越低. 烧结温度 1 200℃时,砷的浸出浓度为 0.002 mg·L⁻¹. 在 TCLP 浸出试验中,在1 200℃烧结时,烧结体中砷的浸出率最低,为 1.79%. 因此,从烧结体的环境安

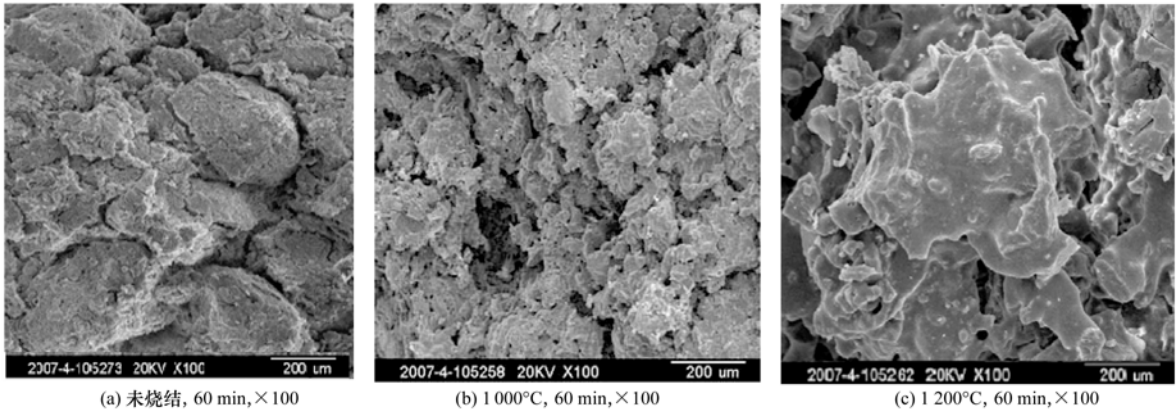


图6 不同烧结温度烧结体扫描电镜

Fig. 6 Scanning electron micrographs of sintered body at different sintering temperatures

全性考虑,最佳的烧结条件为:烧结温度1 200℃.

(3) 含砷废渣烧结过程中,烧结温度低于1 000℃时 FeAsS 发生氧化反应,As 转变为 As_2O_3 , As_2O_3 又与 Ca、Al、Fe 反应生成钙砷、铝砷和铁砷,以钙砷占优势地位,存在形态为 $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$. FeAsS 难溶于水, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 微溶于水,导致烧结温度低于1 000℃,烧结体的砷浸出浓度增大.

(4) 烧结温度升高到1 200℃时,烧结体处于熔融态, $\text{Ca}_3(\text{AsO}_4)_2$ 被玻璃熔融态所包围,并被转换为硅钙砷酸盐化学链接,导致砷的浸出水平显著降低.

参考文献:

- [1] Nordstrom D K. Worldwide occurrences of arsenic in ground water[J]. Science, 2002, **296**(5576): 2143-2145.
- [2] 崔丽珍. 废弃物化学组分的毒理和处理技术[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
- [3] Monhemius A J, Swash P M. Removing and stabilizing as from copper refining circuits by hydrothermal processing[J]. Journal of Hazardous Materials, 1999, **51**(9): 30-33.
- [4] 金哲南, 蒋开喜, 魏绪钧, 等. 有色冶金工业含砷废弃物的处理现状与展望[J]. 有色金属(冶炼部分), 1999, (6): 9-11.
- [5] 刘树根, 田学达. 含砷固体废物的处理现状与展望[J]. 湿法冶金, 2005, **24**(4): 183-186.
- [6] 汪海涛. 含砷废渣的稳定化/固化处理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2007.
- [7] Shih C J, Lin C F. Arsenic contaminated site at an abandoned copper smelter plant: waste characterization and solidification/stabilization treatment[J]. Chemosphere, 2003, **53**(7): 691-703.
- [8] Sullivan C, Tyrer M, Cheeseman C R, et al. Disposal of water treatment wastes containing arsenic-A review[J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(8): 1770-1778.
- [9] Yoon I N, Moonb D H, Kim K W, et al. Mechanism for the stabilization/solidification of arsenic-contaminated soils with Portland cement and cement kiln dust[J]. Journal of Environmental Management, 2010, **91**(11): 2322-2328.
- [10] Singh T S, Pant K K. Solidification/stabilization of arsenic containing solid wastes using portland cement, fly ash and polymeric materials[J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, **131**(1-3): 29-36.
- [11] 王兴润, 金宜英, 聂永丰, 等. 污泥烧结轻骨料调质影响研究[J]. 环境科学研究, 2008, **21**(6): 85-89.
- [12] Chang F C, Lo S L, Lee M Y, et al. Leachability of metals from sludge-based artificial lightweight aggregate[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **146**(1-2): 98-105.
- [13] Wang X R, Jin Y Y, Wang Z Y, et al. A research on sintering characteristics and mechanisms of dried sewage sludge[J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **160**(2-3): 489-494.
- [14] Wang X R, Jin Y Y, Wang Z Y, et al. Development of lightweight aggregate from dry sewage sludge and coal ash[J]. Waste Management, 2009, **29**(4): 1330-1335.
- [15] Huang S C, Chang F C, Lo S L, et al. Production of lightweight aggregates from mining residues, heavy metal sludge, and incinerator fly ash[J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, **144**(1-2): 52-58.
- [16] Kockal N U, Ozturan T. Durability of lightweight concretes with lightweight fly ash aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2011, **25**(3): 1430-1438.
- [17] 王雷, 金宜英, 聂永丰, 等. 添加剂和水洗对焚烧飞灰烧结过程中重金属迁移特性的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(4): 1232-1237.
- [18] GB 5085.3-2007, 危险废物鉴别标准 浸出毒性鉴别[S]. 2007. 167-169.
- [19] Riley C M. Relation of chemical properties to the bloating of clays[J]. American Ceramic Society, 1991, **34**(4): 121-128.
- [20] HJ 557-2010, 固体废物浸出毒性浸出方法 水平振荡法[S].
- [21] USEPA. Toxicity characteristic leaching procedure[S]. Method 1311, 1992.
- [22] Poletti A, Pomi R, Trinci L, et al. Engineering and environmental properties of thermally treated mixtures containing MSWI fly ash and low-cost additives[J]. Chemosphere, 2004, **56**(10): 901-910.
- [23] 王琨生, 蔡振球, 张祉祥, 等. 都市垃圾焚化底灰烧结过程物种变化对重金属溶出之影响[J]. 国立中央大学环境工程学报, 1999, (6): 103-113.
- [24] 张俊丽. 危险废物水泥窑共处置重金属的环境安全性研究[D]. 北京: 清华大学, 2008.
- [25] 朱义年, 张华, 梁延鹏, 等. 砷酸钙化合物的溶解度及其稳定性随 pH 值的变化[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1652-1660.

CONTENTS

Preface	CHEN Wei-ping (4069)
Ecological Risks of Reclaimed Water Irrigation: A Review	CHEN Wei-ping, ZHANG Wei-ling, PAN Neng, <i>et al.</i> (4070)
Study on Soil Enzyme Activities and Microbial Biomass Carbon in Greenland Irrigated with Reclaimed Water	PAN Neng, HOU Zhen-an, CHEN Wei-ping, <i>et al.</i> (4081)
Soil Salinity in Greenland Irrigated with Reclaimed Water and Risk Assessment	PAN Neng, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4088)
Effect of Reclaimed Water Irrigation on Soil Properties and Vertical Distribution of Heavy Metal	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4094)
Simulation of Effect of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Water-Salt Movement by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4100)
Simulation of Effects of Soil Properties and Plants on Soil Water-salt Movement with Reclaimed Water Irrigation by ENVIRO-GRO Model	LÜ Si-dan, CHEN Wei-ping, WANG Mei-e (4108)
Modeling the Cd Accumulation in Agricultural Soil Irrigated with Reclaimed Water	ZHAO Zhong-ming, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao, <i>et al.</i> (4115)
Model Simulation of the Transportation, Transformation and Accumulation of Synthetic Musk in Soils Input Through Recycle Water Irrigation	WANG Mei-e, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4121)
Impacts of Reclaimed Water Irrigation of Urban Lawn on Groundwater Quality	WANG Qiao-huan, CHEN Wei-ping, WANG Xiao-ke, <i>et al.</i> (4127)
Public Awareness Assessment of Water Reuse in Beijing	ZHANG Wei-ling, CHEN Wei-ping, JIAO Wen-tao (4133)
Temporal and Spatial Distribution of Ozone Concentration by Aircraft Sounding over Beijing	CHEN Peng-fei, ZHANG Qiang, QUAN Jian-nong, <i>et al.</i> (4141)
Emission Strength and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds in Shanghai During 2010 EXPO	WANG Hong-li, CHEN Chang-hong, HUANG Hai-ying, <i>et al.</i> (4151)
Study on Atmospheric VOCs in Gongga Mountain Base Station	ZHANG Jun-he, WANG Yue-si, WU Fang-kun, <i>et al.</i> (4159)
Regional Atmospheric Environment Risk Source Identification and Assessment	ZHANG Xiao-chun, CHEN Wei-ping, MA Chun, <i>et al.</i> (4167)
Carbon Isotopic Compositions of <i>n</i> -Alkanes and <i>n</i> -Alkanoic Acids in the Smoke from Combustion of Rice Straw	LIU Gang, SUN Li-na, LI Jiu-hai, <i>et al.</i> (4173)
Research on NEDC Ultrafine Particle Emission Characters of a Port Fuel Injection Gasoline Car	HU Zhi-yuan, LI Jin, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4181)
Magnetic Response of Street Tree Leaves to Particulate Pollution in Shanghai	LONG Qian, ZHOU Ju-zhen, MENG Jie, <i>et al.</i> (4188)
Diurnal Variations of Greenhouse Gas Fluxes at the Water-Air Interface of Aquaculture Ponds in the Min River Estuary	YANG Ping, TONG Chuan, HE Qing-hua, <i>et al.</i> (4194)
Effects of Simulated Warming on Soil Respiration in a Cropland Under Winter Wheat-Soybean Rotation	LIU Yan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (4205)
Transport and Differentiation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Air from Dashiwei Karst Sinkholes in Guangxi, China	KONG Xiang-sheng, QI Shi-hua, SUN Qian, <i>et al.</i> (4212)
Pollution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water of Songhua River Basin During the Icebound Season	MA Wan-li, LIU Li-yan, QI Hong, <i>et al.</i> (4220)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, CHEN Zhen-lou, BI Chun-juan, <i>et al.</i> (4226)
Pollution Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Riparian Soils Along Urban Rivers of Wenzhou City	ZHOU Jie-cheng, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4237)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Partial Surface Sediments of Liaohe River	WU Jiang-yue, LIU Zheng-tao, ZHOU Jun-li, <i>et al.</i> (4244)
Phenols Pollutants in Soil and Shallow Groundwater of a Retired Refinery Site	PEI Fang, LUO Ze-jiao, PENG Jin-jin, <i>et al.</i> (4251)
Heterogeneous Characteristic of PAHs' Spatial Distribution in a Large Coking Site of China	LIU Geng, GUO Guan-lin, NAN Feng, <i>et al.</i> (4256)
Vertical Distribution and Source Analysis of Organochlorine Pesticides in Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LIAO Xiao-ping, ZHANG Cai-xiang, ZHAO Xu, <i>et al.</i> (4263)
Distribution and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Agricultural Soil of the Chongming Island in Shanghai	LÜ Jin-gang, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (4270)
Mercury and Copper Accumulation During Last Fifty Years and Their Potential Ecological Risk Assessment in Sediment of Mangrove Wetland of Shenzhen, China	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (4276)
Characteristics of Heavy Metal Pollution in the Sediments from Shahe Reservoir, the Upper Reach of the North Canal River	ZHANG Wei, ZHANG Hong, SHAN Bao-qing (4284)
Speciation and Pollution Characteristics of Heavy Metals in the Sediment of Taihu Lake	QIN Yan-wen, ZHANG Lei, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (4291)
Chemical Composition and Daily Variation of Melt Water During Ablation Season in Monsoonal Temperate Glacier Region: A Case Study of Baishui Glacier No. 1	ZHU Guo-feng, PU Tao, HE Yuan-qing, <i>et al.</i> (4300)
Experimental Study on the Environmental Fate of Nitrogen in Snail-Macrophyte Ecosystem for Water Purification	ZHOU Lu-hong, GU Xiao-hong, ZENG Qing-fei, <i>et al.</i> (4307)
Growth Inhibition Effect of Immobilized Pectinase on <i>Microcystis aeruginosa</i>	SHEN Qing-qing, PENG Qian, LAI Yong-hong, <i>et al.</i> (4316)
A Novel Approach of Using Fouling Index to Evaluate NOM Fouling Behavior During Low Pressure Ultrafiltration Process	XIAO Ping, XIAO Feng, ZHAO Jing-hui, <i>et al.</i> (4322)
Characteristics of Monomethylmercury Photodegradation in Water Body	SUN Rong-guo, MAO Wen, MA Ming, <i>et al.</i> (4329)
Degradation of Oxytetracycline with Ozonation in Acetic Acid Solvent	LI Shi-yin, LI Xiao-rong, ZHU Yi-ping, <i>et al.</i> (4335)
Photodegradation Performance and Mechanisms of Carbamazepine and Its Impact Factors	CHEN Chao, ZHAO Qian, FENG Li, <i>et al.</i> (4340)
Investigation of Nitrobenzene Removal by Iron Sulfide (FeS)	WANG Xia-lin, LI Rui-hua (4346)
Experimental Research on <i>In-Situ</i> Auto-Monitoring for Underground Sewage Pipeline Leakage	GUO Lei, JIA Yong-gang, FU Teng-fei, <i>et al.</i> (4352)
Adsorption of Phenol Chemicals by Surfactant-Modified Zeolites	XIE Jie, WANG Zhe, WU De-yi, <i>et al.</i> (4361)
Acute Toxicity of Antibiotics and Anaerobic Digestion Intermediates in Pharmaceutical Wastewaters	JI Jun-yuan, XING Ya-juan, ZHENG Ping (4367)
Study on Phosphorus Removal Capability of Constructed Wetlands Filled with Broken Bricks	WANG Zhen, LIU Chao-xiang, LI Peng-yu, <i>et al.</i> (4373)
Denitrification Water Treatment with Zeolite Composite Filter by Intermittent Operation	QING Cheng-song, BAO Tao, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (4380)
Influence of Nitrate on the Simultaneous Methanogenesis and Denitrification Reaction of Anaerobic Biofilm and Granular Sludge	ZHONG Chen-yu, YE Jie-xu, LI Ruoyu, <i>et al.</i> (4387)
Study on Dewatering of Activated Sludge Under Applied Electric Field	JI Xue-yuan, WANG Yi-li, FENG Jing (4393)
Effects of Multiple Environmental Factors on Trifluorsulfuron-methyl Degradation in Soils	SONG Ning-hui, SHAN Zheng-jun, SHI Li-li, <i>et al.</i> (4400)
Effect of Alkaline Post-Treatment on Physicochemical Property of Digested <i>Spartina alterniflora</i>	CHEN Guang-yin, ZHENG Zheng, CHANG Zhi-zhou, <i>et al.</i> (4406)
Structural Changes in Mineral Phases and Environmental Release Behavior of Arsenic During Sintering of Arsenic-containing Waste	WANG Xing-run, NONG Ze-xi, WANG Qi (4412)
Study on Emission Standard System of Air Pollutants	JIANG Mei, ZHANG Guo-ning, ZHANG Ming-hui, <i>et al.</i> (4417)
Mechanism for Transformation of Environmental Criteria into Environmental Standards in China	BI Cen-cen, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long (4422)
Effect Analysis on the Two Total Load Control Methods for Poisonous Heavy Metals	FU Guo-wei (4428)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年12月15日 33卷 第12期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 12 Dec. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行