

# 高砷河道尾砂还原焙烧脱砷研究\*

## Experiment Research on Removal of Arsenic in the High Arsenic Tailings by the Reducing Roast Method

肖亚琼<sup>1,2,3</sup>, 付广义<sup>2,3\*\*</sup>, 钟振宇<sup>2,3</sup>, 成应向<sup>2,3</sup>, 向仁军<sup>2</sup>

XIAO Yaqiong<sup>1,2,3</sup>, FU Guangyi<sup>2,3</sup>, ZHONG Zhenyu<sup>2,3</sup>, CHENG Yingxiang<sup>2,3</sup>, XIANG Renjun<sup>2</sup>

(1. 湖南农业大学, 湖南长沙 410128; 2. 湖南省环境保护科学研究院, 湖南长沙 410004; 3. 水污染控制技术湖南省重点实验室, 湖南长沙 410004)

(1. Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan, 410128, China; 2. Hunan Province Environmental Protection Science Research Institute, Changsha, Hunan, 410004, China; 3. Hunan Key Laboratory of Water Pollution Control Technology, Changsha, Hunan, 410004, China)

**摘要:**【目的】对河道尾砂富集分离形成的高砷尾砂进行脱砷处理,使之达到高炉冶炼的要求。【方法】在前期氧化焙烧脱砷研究的基础上,分别采用煤基还原焙烧工艺和气基还原焙烧工艺对含砷量为0.47%的河道尾砂氧化焙烧渣进行脱砷试验。考察焙烧温度、时间、还原气氛 $CO/(CO+CO_2)$ 和空气流速等主要影响因素对脱砷效果的影响。【结果】气基还原焙烧的脱砷效果优于煤基还原焙烧。气基还原焙烧的适宜条件:焙烧温度 $900^{\circ}C$ 、焙烧时间约30 min、 $CO/(CO+CO_2)$ 浓度20%、气体流量 $0.5 m^3/h$ ;在适宜的气基还原焙烧条件下,焙烧尾砂中砷的含量可降至0.058%,脱砷率达87.66%。【结论】经气基还原焙烧工艺得到的河道尾砂还原焙烧渣能满足高炉炼铁的要求。

关键词:河道尾砂 还原焙烧 脱砷

中图分类号:X705 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2016)01-0086-06

**Abstract:**【Objective】After river sand separation, the high arsenic tailings were formed, of which arsenic removal treatment was performed to meet the requirements for iron making. 【Methods】Based on the preliminary study of arsenic removal by oxidizing roast, both the coal-based and the atmosphere reduction roasting processes were used to remove the arsenic in the river tailings' oxidizing roasting slag, of which the high arsenic content was up to 0.47%. The impact of major factors on the arsenic removal efficiency were investigated, including calcination temperature and time, reducing atmosphere and air flow. 【Results】The results showed that the atmosphere reductive roasting process exhibited higher efficiency in arsenic removal from the oxidizing roasting slag than the coal-based reduction roasting process. The optimum conditions of atmosphere reductive roasting process were further ascertained. The best calcination temperature was  $900^{\circ}C$  and the roasting time was about 30 min. Meanwhile, the suitable concentration of  $CO/(CO+CO_2)$  was 20% and the gas flow was  $0.5 m^3/h$ . Under above demonstrated appropriate conditions of reduction roasting, the arsenic

收稿日期:2015-12-12

作者简介:肖亚琼(1985-),女,硕士研究生,主要从事环境监测与固体废物重金属检测。

\* 国家水体污染控制与治理科技重大专项项目(2010ZX07212-008-03)和湖南省科技计划项目(2014FJ6035)资助。

\*\* 通讯作者:付广义(1985-),男,助理研究员,主要从事固废资源化以及重金属污染治理等研究, E-mail: 247156519@qq.com。

content of oxidizing roasting slag could be reduced to 0.058%, and the corresponding arsenic removal efficiency reached to 87.66%. **【Conclusion】**The reduction roasting slag obtained by atmosphere reductive roasting treatment can completely meet the requirements of blast furnace smelting on raw material.

**Key words:** mine tailings, reduction roasting, arsenic removal  
DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20160315.013

## 0 引言

**【研究意义】**砷广泛存在于自然界,被世界卫生组织列为首位环境污染物<sup>[1]</sup>。含砷矿物在开采、焙烧、冶炼、化工等生产过程中排放废水、烟尘、废气、废渣会造成砷污染,其中以砷冶炼及其化合物生产和使用过程排放的砷最多,造成的污染最为严重,也最难处理。含砷废渣主要来源于冶炼废渣(砷碱渣、含砷烟灰)、含砷尾矿、处理含砷废水和废酸的沉渣、电子工业品中的含砷废弃物以及电解过程中产生的含砷阳极泥等<sup>[2-4]</sup>。从有色冶金过程来看,进入冶炼厂的砷少部分直接回收成白砷(三氧化二砷)产品,70%的砷弃留于尾矿中,其它的含砷中间产物最终几乎都残留于含砷废渣<sup>[5]</sup>。随着冶金工业的迅速发展,尾矿、尾砂的产生量不断增加,我国矿山尾矿、尾砂库现有2 000多座,尾矿总库容达10亿m<sup>3</sup>,积存量达千亿吨。湖南矿产资源丰富,矿业生产产生大量尾矿、尾砂,尤其是郴州地区。据统计,目前郴州市矿业废渣累计堆存量已达6 598.26万t,占全省工业废渣累计堆存总量的89.87%,有害矿物质污染的耕地达2 000亩<sup>[6]</sup>。郴州市境内仅土法炼砷遗留的砷废渣就有上百万吨,而且绝大多数仅仅被简单覆土填埋,没有得到安全处置。含重金属的尾砂经常流入河道中,其中以临武县境内甘溪河三十六湾矿区尤为突出,甘溪河仅临武段范围内就淤积了尾砂近1亿m<sup>3</sup>,给河流水体造成了严重的重金属污染<sup>[7]</sup>。回收河道尾砂中Pb、Zn、Cd、As等重金属,不仅可以减少尾砂重金属对水生态环境造成的危害,而且具有一定的经济效益和社会效益<sup>[8-9]</sup>。**【前人研究进展】**河道尾砂经富集分离(Fe与S的总量富集达85%以上)得到脱硫后的合格铁精矿,铁精矿可直接用于炼铁,但有害元素As也同时得以富集(含量可达4%以上),而高含量砷的存在对炼铁不利,因此须进行脱砷处理。脱砷方法包括选矿脱砷法、细菌氧化法、NaOH焙烧脱砷法、湿法氧化法、氧化焙烧法、加压氧化法、硝酸分解法、真空脱砷法等<sup>[3,9-12]</sup>。研究发现,高砷河道尾砂中砷的脱除比普通铁矿烧渣中砷的脱除更难,目前的脱砷工艺只能将砷含量脱至1%,远高于高炉炼铁对砷含量低于0.1%的要求。笔者前期的研究发现,高

砷河道尾砂含砷矿物类型多,不但有砷黄铁矿、硫化砷等以硫化物形式存在的含砷矿物,还有氧化砷、砷酸盐等以氧化物形式存在的含砷矿物,因此,以单一气氛焙烧难以将所有的含砷矿物脱除;另外,河道尾砂中的金属化合物易与焙烧过程挥发的As<sub>2</sub>O<sub>3</sub>生成砷酸盐,而影响砷的脱除。虽然气氛的控制是含砷矿物脱除的关键因素,但是控制焙烧的温度以及气氛条件,抑制焙烧过程砷酸盐的生成也很关键。**【本研究切入点】**高砷河道尾砂氧化焙烧渣的还原焙烧工艺还未见实验报道。**【拟解决的关键问题】**在前期氧化焙烧脱砷研究的基础上,分别采用煤基还原焙烧工艺和气基还原焙烧工艺对含砷量为0.47%的高砷河道尾砂氧化焙烧渣进行还原焙烧脱砷试验,考察焙烧温度、时间、还原气氛和空气流速等主要影响因子对脱砷效果的影响。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

以郴州市境内甘溪河三十六湾地区富集分离后的高砷河道尾砂氧化焙烧后的渣样为实验材料。对氧化焙烧温度700℃、焙烧时间60 min、原料粒度—0.074 mm含量占50%、料层厚度10 mm、空气流量5 L/min条件下获得的焙烧矿,检测其化学成分和砷的物相组成,结果见表1和表2。由表1可知,尾砂中主要元素是铁、硫和砷,其中Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量为83.79%,硫和砷含量分别为0.41%和0.47%;其次为脉石矿物SiO<sub>2</sub>、CaO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,含量分别为3.92%、2.23%和0.86%;高砷铁河道尾砂还含有一定的Pb、Zn、Cu等有色金属。

表1 高砷河道尾砂的主要化学成分(%)

Table 1 The principal chemical composition of high arsenic tailings(%)

元素 Element	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	As	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P	S
含量 Content	83.79	0.47	3.92	0.90	0.86	0.02	0.41
元素 Element	K <sub>2</sub> O	CaO	Mn	Cu	Zn	Pb	Sb
含量 Content	0.15	2.23	0.14	0.10	1.61	1.01	0.13

从表2可以看出,砷主要以砷酸盐和硫化砷的形式存在,所占比例分别为75.98%和19.00%,两者合

计含量 94.98%；此外，氧化砷、单质砷和残渣砷分别占 0.59%、0.21 和 4.22%。该结果说明以砷酸盐形式存在的砷在氧化焙烧过程中较难脱除。

表 2 高砷河道尾砂中砷的化学物相分析(%)

Table 2 Chemical phase analyses of arsenic in the high arsenic tailings(%)

砷相 Phase of arsenic	氧化砷 (亚) Arsenious oxide	砷酸盐 Arsenite	硫化砷 Arsenic sulfide	单质砷 Arsenic	残渣砷 Residue of arsenic	总砷 Total ar- senic
含量 Content	0.0028	0.36	0.09	0.001	0.02	0.47
分布率 Distribu- tion ratio	0.59	75.98	19.00	0.21	4.22	100.00

综合化学成分和砷的物相组成特点,可以认为高砷河道尾砂氧化焙烧渣属高度氧化、含铅锌的铁精矿。

再采用 X-射线衍射分析(XRD),得出其矿物组成。从图 1 看出,高砷河道尾砂氧化焙烧渣中金属矿物主要有磁铁矿和赤铁矿,脉石矿物含量较少,主要为石英、方解石、白云石等。

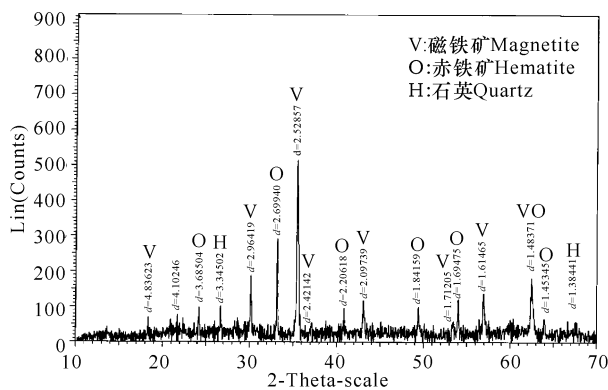


图 1 高砷河道尾砂 X-射线衍射(XRD)图谱

Fig.1 X-ray diffraction(XRD) of high arsenic tailings

## 1.2 方法

针对高砷河道尾砂氧化焙烧渣的特性,分别采用煤基还原焙烧方法和气基还原焙烧方法进行脱砷。煤基还原焙烧方法:首先称取一定量配煤(4%)的焙烧渣样品,放入带盖磁杯中;再将磁杯放进已加温至设定温度的高温管式炉中;然后焙烧至一定时间后取出,磨至一定细度后,采用磁选管进行弱磁选,磁选精矿和尾矿分别过滤、烘干、称重、分析元素品位等。气基还原焙烧方法:首先称取一定量的焙烧渣样品,放入已加温至设定温度的高温管式炉中;然后通入一定流量、压力的还原性气氛,焙烧至一定时间后取出,称重、分析元素品位等。

## 2 结果与分析

### 2.1 温度对煤基还原焙烧的影响

由表 3 可知,随着焙烧温度的升高,脱砷率有先升高后降低的趋势,当温度为 800℃,砷含量可降至最低,此时的脱砷率最大。但砷含量最低降至 0.3%左右,脱砷率约 30%。

表 3 焙烧温度对煤基还原焙烧脱砷的影响

Table 3 The effect of calcination temperature on the reducing roast method of arsenic removal

焙烧温度 Calcination temperature(℃)	焙烧时间 Calcination time(min)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency(%)
750	20	0.33	29.79
800	20	0.32	31.91
850	20	0.34	27.66
900	20	0.35	25.53
750	30	0.33	29.79
800	30	0.32	31.91
850	30	0.33	29.79
900	30	0.34	27.66
750	40	0.35	25.53
800	40	0.31	34.04
900	40	0.33	29.79
850	40	0.34	27.66

### 2.2 时间对煤基还原焙烧的影响

由表 4 可知,随着焙烧时间的延长,砷含量降低,脱砷率呈升高趋势,但变化幅度不大。当焙烧温度为 800℃时,即使焙烧时间延长到 40 min,砷也只能降低到 0.32%,脱砷率为 34.04%。因此,适宜的焙烧时间为 20 min。

表 4 焙烧时间对煤基还原焙烧脱砷的影响

Table 4 The effect of calcination time on the reducing roast method of arsenic removal

焙烧时间 Calcination time(min)	焙烧温度 Calcination temperature(℃)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency(%)
20	750	0.33	29.79
30	750	0.33	29.79
40	750	0.35	25.53
60	750	0.34	27.66
75	750	0.30	36.17
20	800	0.32	31.91
30	800	0.32	31.91
40	800	0.31	34.04
20	850	0.34	27.66
30	850	0.33	29.79
40	850	0.33	29.79
20	900	0.35	25.53
30	900	0.34	27.66
40	900	0.34	27.66

### 2.3 煤基还原焙烧产品检测

将焙烧矿在 800℃ 还原后,采用磁选管(磁场强度 12 000 e)进行弱磁选试验,结果见表 5 和表 6。可知,随着焙烧时间的延长,铁精矿的 TFe 品位略有增加,但铁的回收率逐渐降低。当 800℃ 还原 20 min 时,通过弱磁选可获得铁品位为 64.33% 的铁精矿,铁的回收率达 98.11%。经弱磁选,铁精矿中砷的含量可得到一定程度的降低,但降低幅度不大。

表 5 煤基还原焙烧对选铁指标的影响

Table 5 The influence of reduction roasting on choosing iron indicators

焙烧时间 Calcination time(min)	产品名称 Product name	产率 Productive- rate(%)	TFe 品位 Grade of TFe(%)	TFe 回收率 Recovery rate of TFe(%)
20	精矿 Concentrate	91.48	64.33	98.11
20	尾矿 Tailing	8.52	13.27	1.89
20	给矿 Ore feeding	100.00	59.98	100.00
30	精矿 Concentrate	91.03	64.42	96.72
30	尾矿 Tailing	8.97	22.16	3.28
30	给矿 Ore feeding	100.00	60.63	100.00
40	精矿 Concentrate	90.58	64.54	95.95
40	尾矿 Tailing	9.42	26.21	4.05
40	给矿 Ore feeding	100.00	60.93	100.00

表 6 煤基还原焙烧脱砷

Table 6 The removal of arsenic by gas-based reduction

焙烧时间 Calcination time(min)	产品名称 Product name	产率 Productive- rate(%)	As 含量 Content of As(%)
20	精矿 Concentrate	91.48	0.29
20	尾矿 Tailing	8.52	0.34
20	给矿 Ore feeding	100.00	0.32

### 2.4 温度对气基还原焙烧的影响

以 CO 为还原剂,焙烧温度对气基还原焙烧脱砷的影响结果见表 7。可知,当温度从 700℃ 提高到 900℃ 时,砷含量明显降低,脱砷率显著增加;当温度继续升高到 1 000℃,砷含量降低幅度较小,脱砷率略有增加,因此适宜的还原焙烧温度为 900℃。

### 2.5 时间对气基还原焙烧的影响

由表 8 可知,当焙烧时间从 10 min 延长到 30 min 时,砷含量明显降低,脱砷率显著增加;当时间继续延长到 60 min,砷含量降低幅度较小,脱砷率略有增加,因此适宜的还原焙烧时间为 30 min。

表 7 气基还原焙烧温度对脱砷的影响

Table 7 The influence of calcination temperature of gas-based reduction on the removal of arsenic

焙烧温度 Calcination temperature (°C)	时间 Time (min)	CO/ (CO+CO <sub>2</sub> ) (%)	流量 Flow (m <sup>3</sup> /h)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency (%)
700	30	25	0.5	0.420	10.64
800	30	25	0.5	0.240	48.94
900	30	25	0.5	0.075	84.04
1 000	30	25	0.5	0.071	84.89

表 8 气基还原焙烧时间对脱砷的影响

Table 8 The influence of calcination time of gas-based reduction on the removal of arsenic

时间 Time (min)	焙烧温度 Calcination temperature (°C)	CO/ (CO+CO <sub>2</sub> ) (%)	流量 Flow (m <sup>3</sup> /h)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency (%)
10	900	25	0.5	0.210	55.32
15	900	25	0.5	0.100	78.72
30	900	25	0.5	0.075	84.04
60	900	25	0.5	0.070	85.11

### 2.6 气氛对气基还原焙烧的影响

由表 9 可知,随着还原性气氛 CO/(CO+CO<sub>2</sub>) 浓度的增强,砷含量先降低后增加,脱砷率先提高后降低,当 CO 含量为 20% 时,砷含量降至最低,为 0.058%,此时脱砷率达 87.66%。

表 9 气基还原焙烧气氛对脱砷的影响

Table 9 The influence of roasting atmosphere of gas-based reduction on the removal of arsenic

CO/ (CO+CO <sub>2</sub> ) (%)	焙烧温度 Calcination temperature (°C)	时间 Time (min)	流量 Flow (m <sup>3</sup> /h)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency (%)
10	900	30	0.5	0.120	74.47
20	900	30	0.5	0.058	87.66
25	900	30	0.5	0.075	84.04
35	900	30	0.5	0.180	61.70

### 2.7 气体流速对气基还原焙烧的影响

由表 10 可知,随着气体流量的增大,砷含量先降低后增加,脱砷率先提高后降低。

表 10 气基还原气体流速对脱砷的影响

Table 10 The effect of gas velocity of gas-based reduction on the removal of arsenic

流量 Flow (m <sup>3</sup> /h)	焙烧温度 Calcination temperature (°C)	时间 Time (min)	CO/ (CO+CO <sub>2</sub> ) (%)	As 含量 Content of As(%)	脱砷率 Removal efficiency (%)
0.25	900	30	20	0.088	81.28
0.5	900	30	20	0.058	87.66
1.0	900	30	20	0.160	65.96

## 2.8 气基还原焙烧产品检测

对焙烧温度 900℃、焙烧时间 30 min、CO/(CO+CO<sub>2</sub>)的浓度 20%、气体流量 0.5 m<sup>3</sup>/h 条件下得到的焙烧矿进行弱磁选,结果见表 11。将获得的精矿进行多元素分析,结果见表 12。

表 11 还原焙烧对选铁指标的影响

Table 11 The effect of reducing roast method of arsenic on choosing iron

产品名称 Product name	产率 Productive-rate(%)	TFe 品位 Grade of TFe(%)	TFe 回收率 Recovery rate of TFe(%)
精矿 Concentrate	90.91	64.77	97.39
尾矿 Tailing	9.09	19.36	2.61
给矿 Ore feeding	100.00	60.46	100.00

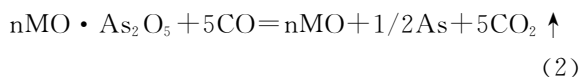
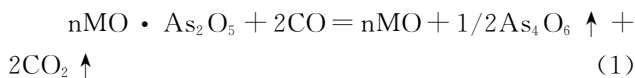
表 12 最终产品的多元素分析结果(%)

Table 12 The multielement analysis of the end product(%)

元素 Element	TFe	As	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P
含量 Content	64.77	0.061	2.18	0.38	0.62	0.029
元素 Element	CaO	K <sub>2</sub> O	Cu	Zn	Pb	S
含量 Content	2.02	0.16	0.128	1.172	0.524	0.46

## 2.9 还原焙烧过程中含砷矿物的行为分析

硝酸盐在弱氧化气氛中比较稳定,但在弱还原气氛下可发生如下反应:



在弱氧化性气氛下,硝酸盐主要被还原成 As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 而挥发(反应式 1),但当还原性气氛过强(如 CO 浓度过高或加碳量过多)时,As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 会继续被还原成单质 As,而物料中的铁氧化物也会还原成金属铁,由于在高温下砷和铁有很强的亲和力,极易生成 FeAs 和 Fe<sub>2</sub>As 类的金属间化合物,从而阻碍砷的挥发脱除。

硝酸盐的还原主要受温度和气氛的影响。试验表明,当还原温度为 700℃ 时,虽然硝酸盐的还原反应已经开始,但反应速度比较慢,因此砷的脱除效果并不明显;但当温度提高到 900℃ 时,砷含量明显降低,脱砷率显著增加,反应式(1)能够充分进行,铁渣中砷可脱除至较低的程度。而气氛的影响表明,随着还原性气氛 CO/(CO+CO<sub>2</sub>)浓度的增强,砷含量先降低后增加,脱砷率先提高后降低,当 CO 含量为 20% 时,砷含量降至最低,为 0.058%,此时脱砷率达 87.66%。而当 CO/(CO+CO<sub>2</sub>)比值提高到 35% 时,由于还原性气氛过强,使得反应式(2)的发生,导致最

终产品中砷的含量提高。

## 3 结论

1)煤基还原焙烧适宜的条件为焙烧温度 800℃、焙烧时间 20 min,此时砷的含量降低至 0.32%,还原焙烧脱砷率为 31.91%。还原焙烧后,通过弱磁选分选工艺,可获得铁品位为 64.33%、砷含量为 0.29% 的铁精矿,铁的回收率达 98.11%。

2)气基还原焙烧适宜的条件为焙烧温度 900℃、焙烧时间 30 min、CO/(CO+CO<sub>2</sub>)的浓度 20%、气体流量 0.5 m<sup>3</sup>/h,此时砷的含量可降低至 0.058%,还原焙烧脱砷率可达到 87.66%。还原焙烧后,通过弱磁选分选工艺,可获得铁品位为 64.77%、砷含量为 0.061% 的铁精矿,铁的回收率达 97.39%。

3)在脱砷效果方面,气基还原焙烧明显优于煤基还原焙烧。高砷河道尾砂氧化焙烧渣通过气基还原焙烧后得到合格的钢铁厂原料。

## 参考文献:

- [1] 张印.含砷废渣火法资源化过程污染分析及健康风险评估[D].兰州:兰州大学,2012.  
ZHANG Y. Pollution Analysis and Health Risk Assessment of Pyrometallurgical Process of Recycling Arsenic Waste Residue [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [2] 余宝元.前苏联有色冶金工业应用的脱砷工艺[J].有色矿冶,1992(1):33-40.  
YU B Y. Process scheme of dearsenization of nonferrous mining of The Former Soviet Union[J]. Non-Ferrous Mining and Metallurgy,1992(1):33-40.
- [3] 梁峰.砷污染治理及其资源化的研究[D].长沙:中南大学,2004.  
LIANG F. Treatment and Resource Study of Arsenic Pollution [D]. Changsha: Cenartl South University, 2004.
- [4] 马承荣.含砷废渣资源化利用技术现状[J].广东化工,2013(6):119-120.  
MA C R. Current situation of resource utilization technologies of arsenic waste residue[J]. Guangdong Chemical Industry,2013(6):119-120.
- [5] 陈庆,黄革非,邝田顺,等.湖南郴州市矿业活动引发的环境问题及防治措施[J].国土资源导刊,2005(4):32-34.  
CHEN Q, HUANG G F, KUANG T S, et al. Environmental problems and control measures of Chenzhou city of Hunan province caused by mining activities [J]. Land & Resources Herald,2005(4):32-34.
- [6] 曾敏,廖柏寒,曾清如,等.湖南郴州、石门、冷水江 3 个  
Guangxi Sciences, Vol 23 No 1, February 2016

- 矿区 As 污染状况的初步调查[J]. 农业环境科学学报, 2006(2):418-421.
- ZENG M, LIAO B H, ZENG Q R, et al. Preliminary investigation of arsenic pollution of 3 mining areas in Chenzhou, Shimen, and Lengshuijiang, 3 cities in Hunan [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006(2): 418-421.
- [7] 史振环, 莫佳, 莫斌吉, 等. 有色金属矿山尾矿砷污染及其研究意义[J]. 有色金属: 矿山部分, 2015, 57(2): 58-62.
- SHI Z H, MO J, MO B J, et al. Arsenic pollution and its research significance in non-ferrous metal mine tailings [J]. Non-ferrous Metals: Mining Section, 2015, 57(2): 58-62.
- [8] 李艺. 有色多金属矿山砷污染对生态环境的影响及其治理分析[J]. 地球与环境, 2008(3): 256-260.
- LI Y. The impact of arsenic pollution of non-ferrous metal mine on ecological environment and its analysis [J]. Earth and Environment, 2008(3): 256-260.
- [9] 魏昶, 姜琪, 罗天骄, 等. 重有色金属冶炼中砷的脱除与回收[J]. 有色金属, 2003, 55(S1): 46-50.
- WEI X, JIANG Q, LUO T J, et al. The elimination and recovery of As in heavy non-ferrous smelting[J]. Non-ferrous Metals, 2003, 55(S1): 46-50.
- [10] 李峰, 丁德馨, 胡南, 等. 难处理含金硫精矿的焙烧氧化-硫代硫酸盐浸出[J]. 中国有色金属学报, 2014(3): 831-837.
- LI F, DING D X, HU N, et al. Roasting oxidation-thio-sulfate leaching of gold from refractory gold-bearing sulfur concentrates[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014(3): 831-837.
- [11] 张谷平. 细菌氧化含砷金矿中脱砷试验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- ZHANG G P. Dearsenicating Study During Oxidation of Gold Ore Containing Arsenic by *Bacillus* [D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [12] 田原, 付广义, 邹冬生, 等. 高砷尾砂湿法预处理工艺研究[J]. 环境工程, 2014(S1): 685-688.
- TIAN Y, FU G Y, ZHOU D S, et al. Study on the technology of high arsenic tailings wet pretreatment [J]. Environmental Engineering, 2014(S1): 685-688.

(责任编辑: 尹 闯)