

安徽铜陵杨山冲浅层富硫化物尾矿中砷的赋存状态

朱翔宇, 王汝成, 陆现彩, 黄思宇, 刘欢, 李娟, 陈笑夜, 陆建军

(内生金属矿床成矿机制研究国家重点实验室, 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093)

摘要: 含硫化物尾矿常常释放大量的酸性排水和重金属, 污染地下水、地表水和土壤, 破坏生态系统, 因此日益成为人们关注的焦点。本文以安徽铜陵杨山冲尾矿库浅层富硫化物尾矿为研究对象, 利用扫描电镜 (SEM)、电子探针 (EPMA)、粉末 X 射线衍射 (XRD)、拉曼光谱 (Raman)、光电子能谱 (XPS) 和同步辐射近边吸收精细结构谱 (XANES) 等方法, 系统分析了尾矿中砷的赋存形式, 发现尾矿中的砷有 3 种价态: $As(-I)$ 、 $As(III)$ 和 $As(V)$ 。在风化较弱的下部尾矿中, 砷以 $As(-I)$ 、 $As(III)$ 和 $As(V)$ 的形式赋存; 而强烈风化的表层尾矿中只检测到 $As(V)$ 的存在。从下部到表层, 从低价态的 $As(-I)$ 和 $As(III)$ 逐渐变为高价态的 $As(V)$ 。下部尾矿中的砷主要赋存于黄铁矿中, 而表层尾矿中的砷主要赋存在铁的(氢)氧化物和硫酸盐中。

关键词: 尾矿; 砷; 赋存状态; XANES; XPS

中图分类号: P579; P618.41

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2013)06-0918-07

Modes of occurrence of arsenic in surface sulfide-rich tailings of Yangshanchong, Tongling, Anhui Province

ZHU Xiang-yu, WANG Ru-cheng, LU Xian-cai, HUANG Si-yu, LIU Huan, LI Juan, CHEN Xiao-ye
and LU Jian-jun

(State Key Laboratory for Mineral Deposits Research, School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University,
Nanjing 210093, China)

Abstract: Releasing large amounts of acidic water and heavy metals, polluting groundwater and surface water, and damaging ecosystem, mine tailings have become a focus of attention. Using multiple analytical technologies such as scanning electron microscope (SEM), Electro-Probe Microanalyzer (EPMA), (X-Ray Powder Diffraction) XRD, Raman Spectroscopy (Raman), X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) and X-ray absorption near edge structure (XANES), the authors studied the modes of occurrence of arsenic in the tailings from the Yangshanchong tailing pool in Tongling, Anhui Province. The results show that there are three different valences of arsenic in tailings, i. e., $As(-I)$, $As(III)$ and $As(V)$. In the less weathered tailings of the lower part, arsenic exists as $As(-I)$, $As(III)$ and $As(V)$; in the strongly weathered tailings of the upper part, only $As(V)$ has been observed. The analysis reveals that $As(-I)$ and $As(III)$ gradually turns to $As(V)$ from bottom to top. Arsenic of the lower tailings mainly occurs in pyrite, while on the surface, arsenic is mostly distributed in ferric oxyhydroxides and sulfates.

Key words: tailings; arsenic; mode of occurrence; XANES; XPS

收稿日期: 2013-10-10; 修订日期: 2013-10-30

基金项目: 科技部 973 课题 (2014CB846004); 国家自然科学基金 (40930742, 10979018)

作者简介: 朱翔宇 (1989-), 研究生, 研究方向为矿物学; 通讯作者: 王汝成, E-mail: rcwang@nju.edu.cn。

砷既是人体必须的微量元素,也是危害非常严重的污染元素(Mandal and Suzuki, 2002)。流行病学研究表明,砷具有致突变、致癌、致畸作用,砷中毒与皮肤病、肝癌、肺癌等密切相关(Hutton, 1987; Tseng, 1989; Cabrera and Gomez, 2003)。不同化学形态的砷具有不同的化学活动性和毒性。一般来说砷化物的毒性有如下顺序:As(III) > As(V) > As(-I),其中As(III)的毒性大约是As(V)的100倍(Jain and Ali, 2000)。

砷在地壳中含量很低,有时以游离态存在,但主要以硫化物的形式存在,如雌黄(As₂S₃)、雄黄(As₂S₂)和毒砂(FeAsS)等,硫化物矿石中的黄铁矿是最为重要的砷载体矿物类型。在矿山开发和冶金过程中,废弃矿石和尾矿中的含砷硫化物通过微生物氧化、化学氧化作用,致使砷以离子的形式释放,经沉淀-水解作用、吸附-解吸作用、同沉淀与离子交换作用、氧化-还原作用、胶体形成作用等一系列的地球化学过程进行迁移和转化,最终以一种或多种化学形态驻留于环境中,造成严重的污染或成为永久性的潜在危害(许乃政等, 2001; 陈天虎, 2001; Salvarredy-Aranguren *et al.*, 2008)。

砷在环境中的赋存方式多种多样,在砷高度富集的尾矿表层,会出现砷华(As₂O₃)和臭葱石(FeAsO₄)等砷矿物(Drahota and Filippi, 2009)。但在更多情况下,砷是以吸附态或类质同像替代的形式存在于硫酸盐矿物中(Foster *et al.*, 1998; Brown *et al.*, 1999)。研究发现在pH < 2.5的酸矿水中,砷

可以进入黄钾铁矾或羟基硫酸铁矿物(简称施氏矿物)的晶格(Brown *et al.*, 1999; Burton *et al.*, 2009)。而在pH值相对较高的酸矿水中,黄钾铁矾和羟基硫酸铁矿物变得不稳定,砷可以被其他高比表面积的矿物(如六方铁矿、水铁矿)吸附(Fukushi *et al.*, 2003; Courtin-Nomade *et al.*, 2005)。

砷的赋存形态直接关系到其化学活动性。研究发现吸附于铁氧化物表面的砷比结晶的砷铁钙石更不易溶出(Paktunc *et al.*, 2004)。而在酸矿水流出矿山与河水混合时,酸矿水中悬浮的砷酸盐和亚砷酸盐会发生溶解(Gault *et al.*, 2003),但被含水的铁和铝的氧化物吸附的砷则能随胶体颗粒继续运移(Kimball *et al.*, 1995)。

本文以铜陵杨山冲尾矿库为研究对象,系统研究砷的赋存状态,从而评价该地区尾矿中砷的可迁移性、活动性和毒性,为当地砷污染的治理提供理论指导作用。

1 研究区概况

杨山冲尾矿库位于安徽铜陵西湖镇朝山村,库区隶属狮子山铜矿,是一座山谷型尾矿库(图1a),1966年始用,1990年服役期满闭库。该库占地面积0.365 km²,库容为747万m³,已堆存尾矿1308万吨。闭库后曾进行生态修复(沈振国等, 2000)。但是,近年来又对尾砂进行二次选矿,使尾砂重新暴露

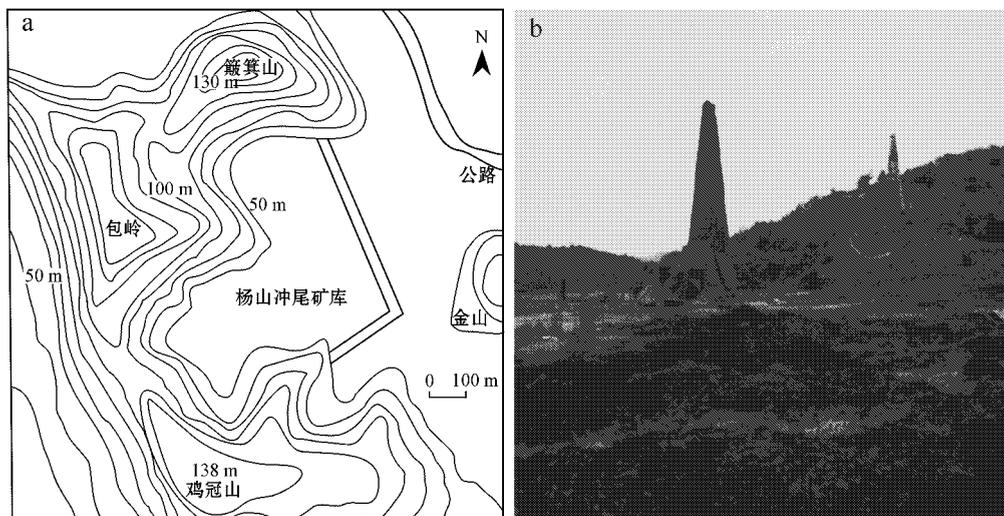


图1 杨山冲尾矿库地形图(a, 据周元祥等, 2010)和尾矿库实景图(b)

在地表(图 1b), 导致环境更加恶化(王少华等, 2011)。

2 实验样品和分析方法

2.1 实验样品

样品采集于杨山冲尾矿库, 为浅层富硫化物尾矿, 深度约为 40 cm, 可以观察到分层现象。本次研究分别采取了下部的青黑色尾矿和表层的黄褐色尾矿(图 2)。尾矿采集后密封、冷藏保存。



图 2 采样点照片

Fig. 2 Image of the samples

2.2 分析方法

X 射线衍射分析(XRD)在日本理学 Dmax III 型 X 射线衍射仪上完成, 光管电压 40 kV, 光管电流 20 mA, 扫描范围 $3^{\circ} \sim 70^{\circ}$, 扫描步进角 0.02° , 扫描单位计数时间 0.3 s。拉曼光谱的采集使用 Leica 20×物镜、激光波长为 514 nm 的风冷式氩离子激光器(最大输出功率为 100 mW, 稳定输出功率为 80 mW), 以 60 s 积分时间、1 次扫描次数的条件采集光谱, 拉曼光谱分辨率为 2 cm^{-1} 。尾矿组成矿物的表面形貌在日本电子 JSM-6490 型扫描电镜上观察, 加速电压 20 kV, spotsize 为 50; 成分分析由牛津仪器 Oxford INCA X 射线能谱仪(EDS)测定, $WD = 10$ 。背散射电子像观察和定量成分分析主要利用 JEOL JXA-8100 型电子探针, 加速电压 15 kV, 加速电流 20 nA, 束斑直径 $< 1 \mu\text{m}$ 。X 射线光电子能谱(XPS)分析在南京现代分析中心完成, 使用 PHI5000VersaProbe 型电子能谱仪分析, 单色化 Al K, 高压 15 kV, 功率 150 W, 通能 20 eV, 步长为 0.1 eV; 以表面污染碳的

C(1s) 结合能(284.6 eV) 定标, 分析时真空度 $< 6.7 \times 10^{-8} \text{ Pa}$ 。X 射线吸收近边精细谱(XANES)分析在上海光源 BL15U 微聚焦线站进行, 工作模式为荧光模式, 扫描范围 11 827~11 947 eV, 分析束斑 $10 \mu\text{m}$, 扫描步长 0.5 eV, 积分时间 2 s。

3 实验结果

3.1 XRD 和 Raman 分析结果

根据两层样品的 XRD 分析结果(图 3), 可知尾矿中仍有一定含量的原生矿物, 如黄铁矿和石英, 次生矿物以石膏和黄钾铁矾为主。黄钾铁矾的特征峰在表层尾矿谱图中很明显而在下部样品中几乎不可见, 说明表层尾矿氧化程度远高于下部尾矿。根据尾矿样品表面的颜色差异, 选择不同位置进行显微激光 Raman 分析, 结果显示表层尾矿中除含有石膏、黄钾铁矾之外, 局部还含有少量的针铁矿、单质硫等次生矿物(图 4)。综合两种方法的分析结果, 认为次生矿物有石膏、针铁矿、黄钾铁矾和单质硫等。

3.2 SEM 和 EPMA 分析结果

扫描电镜观察和能谱分析结果表明: 下部尾矿中黄铁矿为含砷黄铁矿(图 5a, 表 1), 砷质量分数高达 1.34%, 黄铁矿的氧化程度较低, 仅表面被氧化形

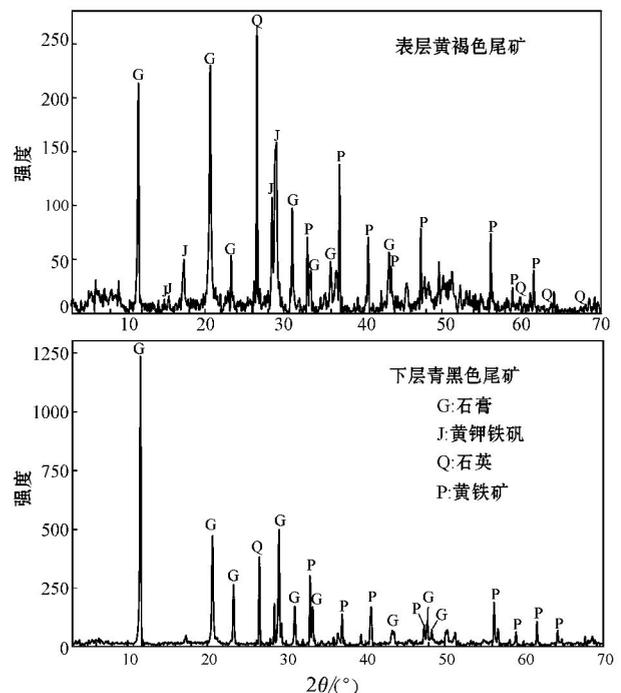


图 3 尾矿样品的 XRD 图谱

Fig. 3 XRD pattern of the surface tawny talings

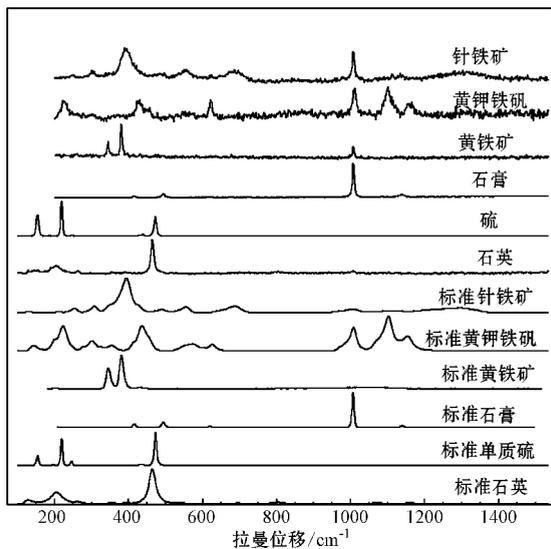


图 4 表层尾矿样品的 Raman 谱与来自 RRUFF 数据库中的标准谱对比

Fig. 4 Raman spectra of tailings and mineral reference data from RUFF database

成一层含砷薄膜(图 5b, 表 1)。而表层尾矿氧化程度较高, 未见大颗粒黄铁矿, 砷主要赋存在氧化产物铁(氢)氧化物(图 5c, 表 1)及铁硫酸盐中(图 5d, 表

1), 砷的含量最高可达 3.67%。

电子探针数据同样显示表层尾矿中 As 主要赋存在铁硫酸盐及铁(氢)氧化物中(图 6a, 6b, 表 2), 砷的最高含量可至 8.76% (As₂O₅ 含量为 13.433%)。背散射电子像表明: 次生的含砷矿物往往填充在石英、黄铁矿和石膏晶间。

3.3 XANES 和 XPS 分析结果

由 XANES 分析结果(图 7a)可知, 表层黄褐色尾矿中砷主要为 As(V), 而下部青灰色尾矿中则同时含有 As(V) 和 As(III)。对下部尾矿的局部区域进一步进行 XPS 分析以分析砷的价态, 参考前人对氧化毒砂的 XPS 分析模型(Nesbitt and Muir, 1998)进行分峰拟合(图 7b), 结果表明下部尾矿除含 As(V) (52.8%) 和 As(III) (32.6%) 外, 还有少量 As(-I) (14.7%)。As(-I) 有可能来自于含砷黄铁矿。

4 讨论

4.1 黄铁矿的氧化产物

通过 XRD、显微 Raman、SEM、EPMA 等一系列矿物学分析手段, 发现和尾矿中金属硫化物氧化有关的次生矿物主要为石膏、单质硫、针铁矿、黄钾铁

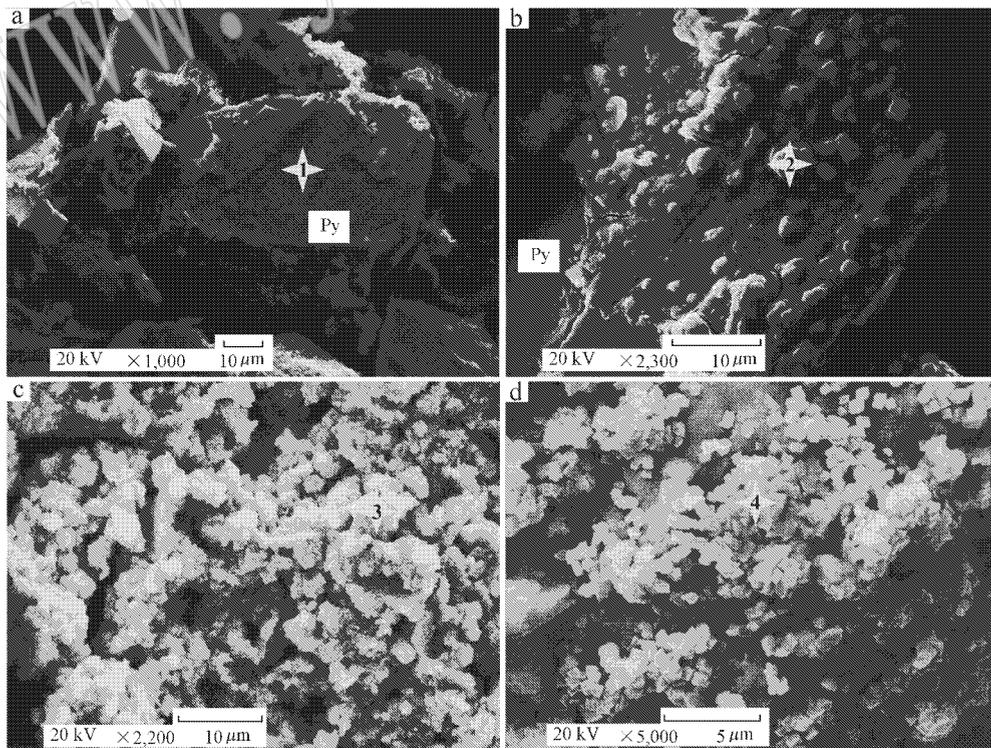


图 5 下部青黑色尾矿(a, b)和表层黄褐色尾矿(c, d)的扫描电镜照片

Fig. 5 SEM image of lower livid tailings(a, b) and upper tawny tailings(c, d)

表 1 尾矿中含砷矿物的能谱分析数据
Table 1 EDS data of As-bearing minerals in tailings

元素	质量分数/%				原子分数/%			
	1	2	3	4	1	2	3	4
O	18.90	46.81	40.71	59.46	26.77	60.34	63.72	80.29
S	34.43	8.55	1.05	12.91	24.34	5.50	0.82	8.70
Fe	25.02	25.96	47.70	25.07	10.15	9.59	21.39	9.70
As	1.34	4.76	3.67	1.35	0.41	1.31	1.23	0.39

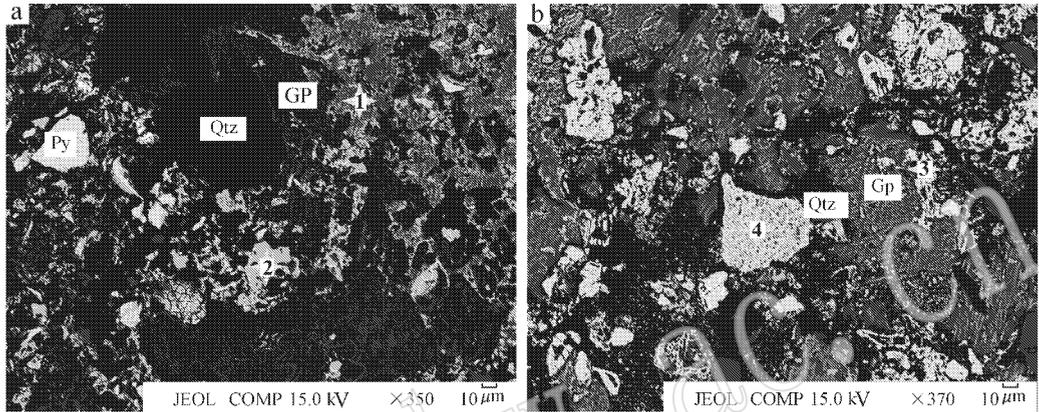


图 6 表层黄褐色尾矿的电子探针背散射照片

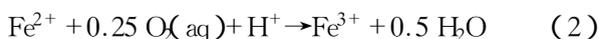
Fig. 6 BSE images of surface tawny tailings
Py—黄铁矿; Gp—石膏; Qtz—石英
Py—pyrite; Gp—gypsum; Qtz—quartz

表 2 表层黄褐色尾矿中含砷矿物的电子探针分析数据 $w_i/\%$

Table 2 EPMA data of As-bearing minerals from surface tawny tailings

元素	1	2	3	4
K ₂ O	0.131	0.008	0.014	0.017
As ₂ O ₃	2.681	0.757	5.482	13.433
CuO	0.833	0.899	—	1.934
TiO ₂	—	—	—	0.641
SiO ₂	2.401	3.935	0.524	0.867
SO ₃	25.698	0.755	3.542	2.557
FeO	52.671	82.539	82.17	69.11
MnO	—	0.102	0.003	0.005
CaO	0.126	0.344	0.318	0.91
Cl	0.011	0.029	0.018	0.007
Total	84.55	89.361	92.067	89.479

矾等。由于尾矿中的金属硫化物主要为黄铁矿,因此推测这些次生矿物应为黄铁矿的氧化产物,相关的氧化反应可由以下方程式表征(Chandra and Gerson, 2010):



在矿山环境中, Fe^{3+} 和 O_2 是黄铁矿氧化过程中最主要的氧化剂(Singer and Stumm, 1970; Nicholson *et al.*, 1988; Moses and Herman, 1991)。前人大量实验研究表明,在金属硫化物的氧化过程中元素硫的氧化是逐步完成的,一般会经过 S_n^{2-} 、 S^0 、 SO_3^{2-} 、 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ 、 $\text{S}_n\text{O}_6^{2-}$ 等多种类型的中间形态(Moses *et al.*, 1987; De Donato *et al.*, 1993; Rimstidt and Vaughan, 2003),其中单质硫的出现被认为是黄铁矿受到微生物间接氧化或化学氧化的有力证据,本研究的显微 Raman 光谱分析检测到了单质硫(图 4),为认识尾矿的氧化机制提供了矿物学线索。在尾矿这一富氧含水环境中,黄铁矿最终的氧化产物为含 Fe^{3+} 和 SO_4^{2-} 的酸性矿山排水,同时使孔隙水的 pH 值快速下降并引起尾矿中碳酸盐矿物的溶解。处于包气带内的浅层尾矿相对干燥, SO_4^{2-} 与溶出的 Ca^{2+} 结合形成石膏沉淀,其次为黄钾铁矾、针铁矿等铁的硫酸盐和(氢)氧化物(Gieré *et al.*, 2003)。

4.2 As 的赋存形式

SEM 结果显示原生黄铁矿中含有砷(图 5a),这种含砷的黄铁矿在下部青黑色尾矿中普遍存在。

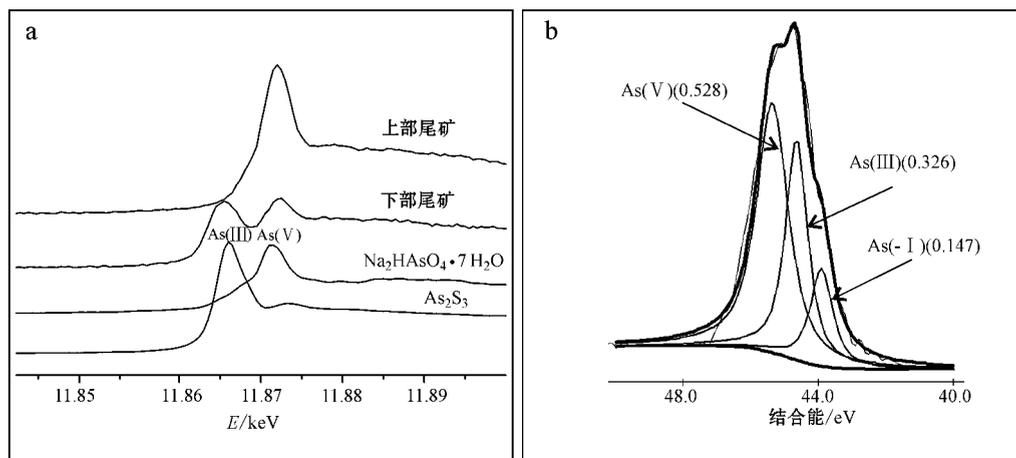


图 7 表层黄褐色尾矿和下部青黑色尾矿中 As 的 K 边 XANES 谱图 (a) 以及下部青黑色尾矿的 XPS 分析 (b)
Fig. 7 As K-edge XANES spectra of lower livid tailing, upper tawny tailing (a) and XPS analyses of the lower livid tailing (b)

Savage 等 (2000) 研究表明:砷是通过类质同像替代黄铁矿中的硫而进入黄铁矿晶格的,而不是以毒砂包裹体或其他含砷矿物的形式存在。黄铁矿中砷的加入,会导致晶格膨胀,所以含砷黄铁矿的稳定性差于普通黄铁矿,从而更易于风化。Bostick 和 Fendorf (2003) 的研究证实在缺氧环境中,环境中的 As(III) 可以吸附在黄铁矿的表面,被表面的 Fe(II) 和 S 还原,形成一层类似毒砂的表面沉淀。SEM 所观察到的下部缺氧环境青黑色尾矿中黄铁矿表面被氧化的现象(图 5b),可能是 As(III)、As(V) 和 O_2 共同氧化的结果。

表层黄褐色尾矿暴露在地表故氧化充分,原生的黄铁矿基本转变成针铁矿、黄钾铁矾等含铁的(氢)氧化物或硫酸盐,砷以 AsO_4^{3-} 的形式吸附在铁(氢)氧化物的表面或以类质同像替代 SO_4^{2-} 的形式进入铁的硫酸盐中(Lu and Wang, 2012)。而下部青黑色尾矿埋藏在地下,氧化程度较低砷可以有低价态的 As(-I) 和 As(III)。

4.3 对尾矿后续治理的一些建议

铜陵杨山冲尾矿库下部含有毒性高的 As(III),一旦进入周围环境,将严重影响当地的农业生产和居民健康。所以建议有关单位一方面做好尾矿库坝体基体的隔水工作,防止砷渗漏进入周边环境;另一方面可以在尾矿库上投放废弃铁制品,不仅可以用来中和酸性矿山排水,氧化生成的含铁矿物还可以用来固定环境中的砷。

5 结论

(1) 尾矿氧化初期砷以类质同像替代的形式存在黄铁矿中或吸附在黄铁矿表面,形成一层类似毒砂的含砷薄膜。随着氧化程度的增强,黄铁矿被氧化为铁的硫酸盐和(氢)氧化物,砷以类质同像替代或吸附态的形式结合在这类物质中。

(2) 由下至上,随着氧气含量的增加,尾矿由青黑色过渡到黄褐色;尾矿中所含的砷由低价态的 As(-I) 和 As(III) 过渡到高价态的 As(V)。

References

- Bostick B C and Fendorf S. 2003. Arsenite sorption on troilite (FeS) and pyrite (FeS₂) [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(5): 909~921.
- Brown G E, Foster A L and Ostergren J D. 1999. Mineral surfaces and bioavailability of heavy metals: A molecular-scale perspective [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96(7): 3388~3395.
- Burton E D, Bush R T, Johnston S G, et al. 2009. Sorption of arsenic(V) and arsenic(III) to schwertmannite [J]. *Environmental Science & Technology*, 43(24): 9202~9207.
- Cabrera H N and Gomez M L. 2003. Skin cancer induced by arsenic in the water [J]. *Journal of Cutaneous Medicine and Surgery*, 7(2): 106~111.
- Chandra A P and Gerson A R. 2010. The mechanisms of pyrite oxida-

- tion and leaching: A fundamental perspective[J]. *Surface Science Reports*, 65(9): 293~315.
- Chen Tianhu. 2001. Progress of mineralogical study on mine tailings[J]. *Geology of Anhui*, 11(1): 64~70(in Chinese with English abstract).
- Courtin-Nomade A, Grosbois C, Bril H, *et al.* 2005. Spatial variability of arsenic in some iron-rich deposits generated by acid mine drainage[J]. *Applied Geochemistry*, 20(2): 383~396.
- De Donato P, Mustin C, Benoit R, *et al.* 1993. Spatial distribution of iron and sulphur species on the surface of pyrite[J]. *Applied Surface Science*, 68(1): 81~93.
- Drahota P and Filippi M. 2009. Secondary arsenic minerals in the environment: a review[J]. *Environment International*, 35(8): 1243~1255.
- Foster A L, Brown Jr G E, Tingle T N, *et al.* 1998. Quantitative arsenic speciation in mine tailings using X-ray absorption spectroscopy[J]. *American Mineralogist*, 83(5): 553~568.
- Fukushi K, Sasaki M, Sato T, *et al.* 2003. A natural attenuation of arsenic in drainage from an abandoned arsenic mine dump[J]. *Applied Geochemistry*, 18(8): 1267~1278.
- Gault A G, Polya D A, Lythgoe P R, *et al.* 2003. Arsenic speciation in surface waters and sediments in a contaminated waterway: an IC-ICP-MS and XAS based study[J]. *Applied Geochemistry*, 18(9): 1387~1397.
- Gieré R, Sidenko N V and Lazareva E V. 2003. The role of secondary minerals in controlling the migration of arsenic and metals from high-sulfide wastes(Berikul gold mine, Siberia) [J]. *Applied Geochemistry*, 18(9): 1347~1359.
- Hutton M. 1987. Human health concerns of lead, mercury, cadmium and arsenic[A]. Hutchinson T C and Meema K M. *Lead, Mercury, Cadmium and Arsenic in the Environment*[C]. John Wiley and Sons, Ltd., NY, Toronto.
- Jain C K and Ali I. 2000. Arsenic: occurrence, toxicity and speciation techniques[J]. *Water Research*, 34(17): 4304~4312.
- Kimball B A, Callender E and Axtmann E V. 1995. Effects of colloids on metal transport in a river receiving acid mine drainage, upper Arkansas River, Colorado, USA[J]. *Applied Geochemistry*, 10(3): 285~306.
- Lu X C and Wang H M. 2012. Microbial oxidation of sulfide tailings and the environmental consequences[J]. *Elements*, 8(2): 119~124.
- Mandal B K and Suzuki K T. 2002. Arsenic round the world: a review[J]. *Talanta*, 58(1): 201~235.
- Moses C O and Herman J S. 1991. Pyrite oxidation at circumneutral pH[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55(2): 471~482.
- Moses C O, Kirk Nordstrom D, Herman J S, *et al.* 1987. Aqueous pyrite oxidation by dissolved oxygen and by ferric iron[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51(6): 1561~1571.
- Nesbitt H W and Muir I J. 1998. Oxidation states and speciation of secondary products on pyrite and arsenopyrite reacted with mine waste waters and air[J]. *Mineralogy and Petrology*, 62(1~2): 123~144.
- Nicholson R V, Gillham R W and Reardon E J. 1988. Pyrite oxidation in carbonate-buffered solution: 1. Experimental kinetics[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(5): 1077~1085.
- Paktunc D, Foster A, Heald S, *et al.* 2004. Speciation and characterization of arsenic in gold ores and cyanidation tailings using X-ray absorption spectroscopy[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 68(5): 969~983.
- Rimstidt J D and Vaughan D J. 2003. Pyrite oxidation: a state-of-the-art assessment of the reaction mechanism[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 67(5): 873~880.
- Salvarredy-Aranguren M M, Probst A, Roulet M, *et al.* 2008. Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley (Cordillera Real, Bolivia): Mineralogical and hydrological influences[J]. *Applied Geochemistry*, 23(5): 1299~1324.
- Savage K S, Tingle T N, O'Day P A, *et al.* 2000. Arsenic speciation in pyrite and secondary weathering phases, Mother Lode gold district, Tuolumne County, California[J]. *Applied Geochemistry*, 15(8): 1219~1244.
- Shen Zhenguo and Chen Huaiman. 2000. Bioremediation of heavy metal polluted soils[J]. *Rural Eco-Environment*, 16(2): 39~44(in Chinese with English abstract).
- Singer P C and Stumm W. 1970. Acidic mine drainage: the rate-determining step[J]. *Science*, 167(3921): 1121~1123.
- Tseng W P. 1989. Blackfoot disease in Taiwan: a 30-year follow-up study[J]. *Angiology*, 40(6): 547~558.
- Wang Shaohua, Yang Jie, Liu Suming, *et al.* 2011. Environmental effects of heavy metal elements release in Yangshanchong tailing pool, Shizishan, Tongling, Anhui Province[J]. *Geological Journal of China Universities*, 17(1): 93~100(in Chinese with English abstract).
- Xu Naizheng, Tao Yuxiang and Gao Nanhua. 2001. Metal deposit environmental pollution and its remediation[J]. *Volcanology & Mineral Resources*, 22(1): 63~70(in Chinese with English abstract).
- Zhou Yuanxiang, Yue Shucang and Zhou Taofa. 2010. Migration of heavy metals in Yangshanchong tailings impoundment in Tongling, Anhui Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 23(4): 497~503(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 陈天虎. 2001. 矿山尾矿矿物学研究进展[J]. *安徽地质*, 11(1): 64~70.
- 沈振国, 陈怀满. 2000. 土壤重金属污染生物修复的研究进展[J]. *农村生态环境*, 16(2): 39~44.
- 王少华, 杨劫, 刘苏明, 等. 2011. 铜陵狮子山杨山冲尾矿库重金属元素释放的环境效应[J]. *高校地质学报*, 17(1): 93~100.
- 许乃政, 陶于祥, 高南华. 2001. 金属矿山环境污染及整治对策[J]. *火山地质与矿产*, 22(1): 63~70.
- 周元祥, 岳书仓, 周涛发. 2010. 安徽铜陵杨山冲尾矿库尾砂重金属元素的迁移规律[J]. *环境科学研究*, 23(4): 497~503.