文章编号：1004-0609(2014)01-0269-10

高铅铜阳极泥的工艺矿物学

杨洪英，李雪娇，佟琳琳，陈国宝

(东北大学 材料与冶金学院，沈阳 110819)

摘 要：为了高效回收高铅铜阳极泥中贵金属，改进阳极泥的现行生产工艺，采用 XRD、SEM 和显微镜等对阳极泥进行工艺矿物学研究。结果表明：阳极泥的颗粒较细，成分复杂，贵金属主要为 Au 0.33%、Ag 9.94%、Pd 0.1%(质量分数)；贱金属主要为 Cu 16.35%、Pb 13.74%。主要物相包括金以及金铅合金、铜银硒化合物、硫酸盐、砷酸盐、锑酸盐以及氧化物。分析得知，金主要有单质金以及金铅合金两种物相，其质量比约为 3:1。其粒度大小不均匀，最大粒度为 15 μm，最小粒度为 0.1 μm。单质金常常被包裹在硫酸铜里面，因而，在提取金之前要先脱铜。银以硒化银和铜银硒的形式存在，3 种元素混溶形成固溶体。主要贱金属铜为单质铜、硫酸铜、铜银硒以及黄铜矿。铅为硫酸铅、锑酸铅、砷酸铅以及硫化铅；砷锑铋化合物主要包括砷酸铅、锑酸铅、砷酸铋和砷酸锑。结构特征分析表明：高铅铜阳极泥以硫酸铜为基底，氧化镍常包裹单质铜，砷酸锑常包裹黄铜矿，硫酸钡与硫酸铅常交互生长。

关键词：铜阳极泥；工艺矿物学；贵金属；金；银；高铅
中图分类号：TF811 **文献标志码**：A

Process mineralogy of high lead copper anode slime

YANG Hong-ying, LI Xue-jiao, TONG Lin-lin, CHEN Guo-bao

(School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: In order to improve the technology of the process of noble metal extracted from high lead copper anode slime, the process mineralogy was investigated by XRD, SEM and microscope. The particle size of high lead anode slime is small, and the composition is complex. The main noble metals are Au 0.33%, Ag 9.94% and Pd 0.1% (mass fraction), and the main base metals are Cu 16.35% and Pb 13.74%. The chief phases include Au and gold-lead alloy, eukairite, sulfate, arsenate, antimonate and oxygen. The results show that there are two main phases of gold as elemental gold and gold-lead alloy with the mass ratio of approximately 3:1. The particle size is uneven, the biggest particle size is about 15 μm and the smallest one is about 0.1 μm. The elemental Au is often wrapped in copper sulfate, so, Cu should be removal before extracting Au. Ag exists in silver selenide and eukairite. Three elements are miscible and form a solid solution. Cu and Pb are major base metal. Cu exists in Cu, copper sulphate, eukairite and chalcopyrite. Pb exists in lead sulfate, lead antimonite, lead arsenate and lead sulphide. Arsenic antimony bismuth compounds mainly include lead antimonite, bismuth arsenate and antimony arsenate. The characteristics of the structure indicates that bought-out anode slime structured on copper sulphate, nickel oxide constantly wrapped copper, antimony arsenate constantly wrapped chalcopyrite, barium sulfate and lead sulfate constantly growed interactively.

Key words: copper anode slime; process mineralogy; noble metal; Au; Ag; high lead

铜阳极泥是在铜电解精炼过程中产出的一种重要副产品。它是由阳极铜在电解精炼过程中不溶于电解液的各种物质所组成[1−3]。铜阳极泥的成分及产率主要取决于铜阳极的成分、铸锭质量及电解的技术条件。

基金项目：国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAE06B05)；国家自然科学基金资助项目(51174062，51104036)；国家高技术研究发展计划项目(2012AA061502)；中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(N110302002)
收稿日期：2013-01-11；**修订日期**：2013-10-08
通信作者：杨洪英，教授，博士；电话：024-83673932；E-mail：yanghy@smm.neu.edu.cn

由于使用的原料不同，不同厂家的阳极泥成分和物相有很大差异。一般来说，电解精炼时，铜电解阳极泥的产出率为粗铜阳极板质量的 0.2%~0.8%。它通常含有 Au、Ag、Cu、Pb、Se、Te、As、Sb、Ni、Bi、S、Sn、Fe、SiO_2、Al_2O_3、铂族金属和水分[4−5]，因此，成为贵金属的主要原料。目前，金银生产中有 46.5%的 Au、74.3%的 Ag 是通过阳极泥获得的[6−8]。选择处理阳极泥流程主要是根据阳极泥的化学成分和生产规模来确定的[9−12]。

近年来，针对铜阳极泥的处理和综合利用的问题，国内外科研机构已经进行了大量的研究。工艺流程中存在一些关键技术问题：1) 金在各工序中分散损失十分严重；2) 金的直接回收率低；3) 工序复杂，返料多；4) 尾料金含量高，而且金产品中铜碲铋等杂质含量多，铅砷等毒害元素残留严重；5) 设备自动化程度低，能耗大；6) 稀散金属硒碲等失散严重；7) 生产中污染较严重。这些都成为冶炼企业生产中急于解决的问题。

为了高效回收阳极泥中的金银，降低尾料金含量，研究阳极泥中金的赋存状态等工艺矿物学问题[13−15]，通过探索得到阳极泥中的物相组成、金银铂等贵金属的赋存状态[16−17]、贵金属与贱金属的关系等，从而为提高阳极泥的生产效率、改进贵金属的提取和工艺流程、降低生产成本和减少污染提供理论依据[18−19]。

1 实验

为了对高铅阳极泥进行工艺矿物学研究，利用 HYDRO2000M-MU 激光粒度仪确定铜阳极泥的粒度分布，采用 XRF 分析高铅铜阳极泥的化学成分。运用 XRD 对阳极泥的物相进行初步分析。然后将铜阳极泥粉末与酚醛树脂混合后，利用制样机制样，并进行抛光，制成光片。利用反光显微镜观察光片矿物特征，利用 SEM 分析高铅铜阳极泥的物相及结构特征。

2 粒度和成分

2.1 粒度分布

使用激光粒度分析仪(HYDRO2000M-MU)对高铅铜阳极泥的粒度进行分析，粒度分析可知高铅铜阳极泥粒级＞35 μm 的占 15.54%，粒级为 10 μm~35 μm 的占 45.95%，粒级＜10 μm 的占 38.71%。

2.2 化学成分

通过对高铅铜阳极泥进行 XRF 分析(见表 1)，分析得知该样品中含有 26 种元素，其中含 Au0.3%、Ag14.5%、Pd0.1%、Cu23.1%、Pb18.8%、Se8.1%、S8.1%、As4.6%、Sb4.5%、Ba 4.5%、C 3.3%、Te1.7%、Ni1.7%、Bi1.2%，其他元素 4.276%包括 Cl、Si、Fe、Al、Cr、Ca、Co、Hf、Zn、Sr、K、P。定量分析表明：阳极泥中富含贵金属，主要包括 Au 0.33%、Ag 9.94%、Pd0.1%；贱金属主要为 Cu 16.35%、Pb 13.74%(见表 2)。因此，综合回收阳极泥中的贵金属(Au、Ag、铂族)、贱金属(Cu、Pb 、Sb、Bi、Ni)以及稀散金属(Se、Te)，除去 As，减少环境污染，简化提取流程，这是当前阳极泥生产工艺的主要攻关方向。

表 1 铜阳极泥的 XRF 分析结果

Table 1 XRF analysis results of copper anode slime (mass fraction, %)

Cu	Pb	Ag	S	Se	As	Ba
23.1	18.8	14.5	9.3	8.1	4.6	4.5
Bi	Fe	Au	Al	Cr	Ca	Co
1.2	0.4	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1
Sb	C	Te	Ni	Cl	Si	Hf
4.5	3.4	1.7	1.7	1.4	1.3	0.1
Pd	Zn	Sr	K	P		
0.1	0.1	0.1	0.04	0.01		

表 2 铜阳极泥的主要元素定量分析结果

Table 2 Quantitative analysis results of copper anode slime (mass fraction, %)

Cu	Pb	Ag	Au	Pd
16.35	13.74	9.94	0.33	0.1

3 物相组成

3.1 XRD 研究

对高铅铜阳极泥进行 XRD 分析，通过分析可知铜阳极泥的主要物相：硫酸盐、砷酸盐、锑酸盐、氧化物、硒化物、合金。硫酸盐包括：硫酸铜、硫酸铅、硫酸钡；砷酸盐包括：砷酸铅；锑酸盐包括：锑酸铅；氧化物包括：氧化镍；硒化物包括：硒化银、硒化铜银(铜银硒)；合金包括金铅合金等(见图 1)。

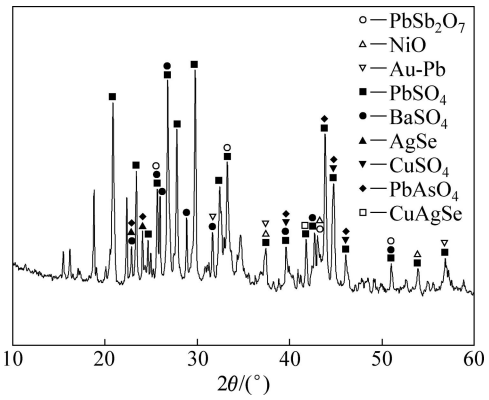

图 1　高铅阳极泥的 XRD 谱

Fig. 1　XRD pattern of high lead anode slime

3.2　扫描电镜及显微镜研究

为了进一步确定铜阳极泥各种硫酸盐、砷酸盐、锑酸盐、氧化物、硒化物、各种合金的物相，利用显微镜、扫描电镜以及电子探针，进行了深入研究。

3.2.1　金

金是阳极泥中重要的贵金属，含量为 0.33%(质量分数)。在阳极泥中金有两种物相：单质金和金铅合金(见图 2)。单质金以及金铅合金质量比约为 3:1。单质金粒度分布不均匀，大颗粒粒度 15 μm，小颗粒粒度 0.1~2 μm，在阳极泥中大部分的单质金为小粒金，单质金主要以被包裹的形式存在。常常被包裹在硫酸铜里面。金的形态有粒状、圆环状、长条状、月牙状、豆状(见图 2(a))。金铅合金粒度范围为 0.1~2 μm，其形态有球形、梯形、三角形以及不规则形状(见图 2(b))。金铅合金成色变化比较大，研究表明大颗粒金成色高，小颗粒金成色低。单质金的成色为 100%，而金铅合金成色变化比较大，由电子探针能谱分析可知，变化范围为 43.42%~100%。图 3 所示为单质金和金铅合金的能谱，显示出单质金为高纯度金，而金铅合金中主峰为金，同时含有铅；在提取金时，金铅合金中的金容易回到返渣中而损失掉。

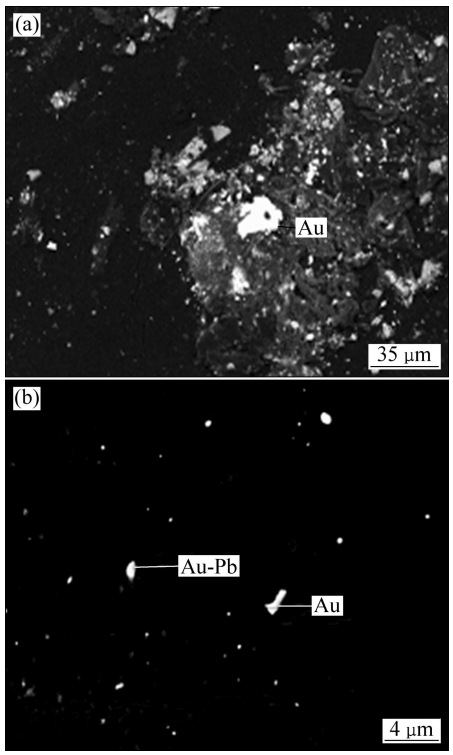

图 2　高铅阳极泥中金的物相形貌

Fig. 2　Phase morphologies of gold in high lead anode slime: (a) Au; (b) Au-Pb, Au

3.2.2　银

阳极泥中的银主要硒化物存在，包括简单的硒化银和成分复杂的硒化铜银(铜银硒)。研究发现与以往文献不同的是阳极泥中银的赋存状态更加复杂[20]。由于阳极泥中成分中杂质硫、铅含量高，由电子探针能谱分析可知，硫含量为 0~8.683%(质量分数)，铅含量

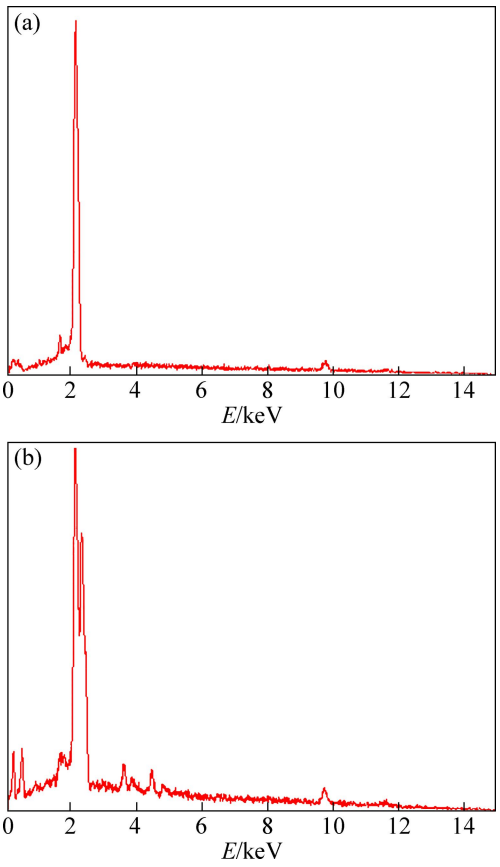

图 3　高铅阳极泥中金的能谱

Fig. 3　EDS spectra of gold in high lead anode slime: (a) Au; (b) Au-Pb

为 0~9.977%(质量分数)，在银的硒化物中存在广泛的类质同像，硫可以少量替代硒，铜、铅可以少量替代银，并且可以混熔，形成固溶体(见图 4)。通过对分析显示在硒化合物中 Ag 是主要元素，其含量为 50.538~78.594%，平均含量为 67.070%；Se 的含量为 12.77~22.99%，平均含量为 19.794%；Cu 的含量为 0~20.848%，平均含量为 9.386%；S 的含量为 0~8.683%，平均含量为 2.919%(见表 3)。图 5 所示为高铅阳极泥中银及其复杂化合物的能谱。这些硒化银和铜银硒以硫酸铜为基底，形态丰富呈多样化分布。

可知硒化银和铜银硒广泛存在固溶现象，形成形态各异的复杂形态，主要有球状、三角状、月牙状、圆环状以及不规则形状。其中球状的占 13.96%，三角状的占 11.63%，月牙状的占 30.23%，圆环状的占 20.93%，不规则形状的占 23.26%。

3.2.3 铜

高铅铜阳极泥的成分复杂，扫描电镜研究表明铜物像有硫酸铜、铜银硒化合物、单质铜以及黄铜矿(见图 6)。其中硫酸铜，铜银硒化合物是主要物像，单质铜以及黄铜矿含量较低。扫描电镜研究表明硫酸铜常常构成铜阳极泥的基底(见图 6(a))，常常包裹有硫酸铅、锑酸铅、砷酸铅、单质铜、硒化铜、硒化银、铜

表 3 铜银硒化合物含量的统计

Table 3 Content statistic of CuAgSe compound

Measuring point	Mass fraction/%			
	Cu	Ag	Se	S
1	17.789	50.538	22.99	8.683
2	10.861	72.936	12.77	3.433
3	15.335	59.111	21.48	4.074
4	10.802	63.777	20.848	4.573
5	5.14	67.707	22.275	4.878
6	16.653	58.19	20.908	4.249
7	6.467	68.391	20.01	5.132
8	3.454	74.317	22.229	0
9	20.848	64.749	14.403	0
10	5.282	77.808	16.91	0
11	0	68.727	21.296	0
12	0	78.594	21.406	0
Maximum	20.848	78.594	22.99	8.683
Minimum	0	50.538	12.77	0
Average	9.386	67.070	19.794	2.919

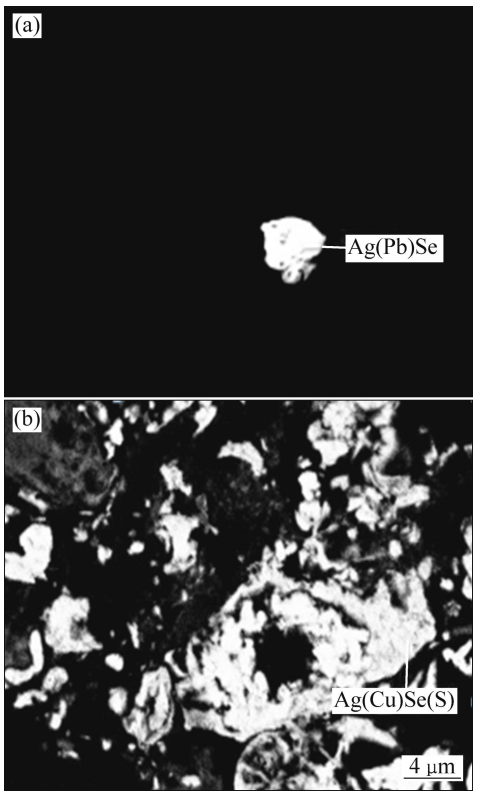

图 4 高铅阳极泥中银的物相形貌

Fig. 4 Phase morphologies of silver in high lead anode slime: (a) Ag(Pb)Se; (b) Ag(Cu)Se(S)

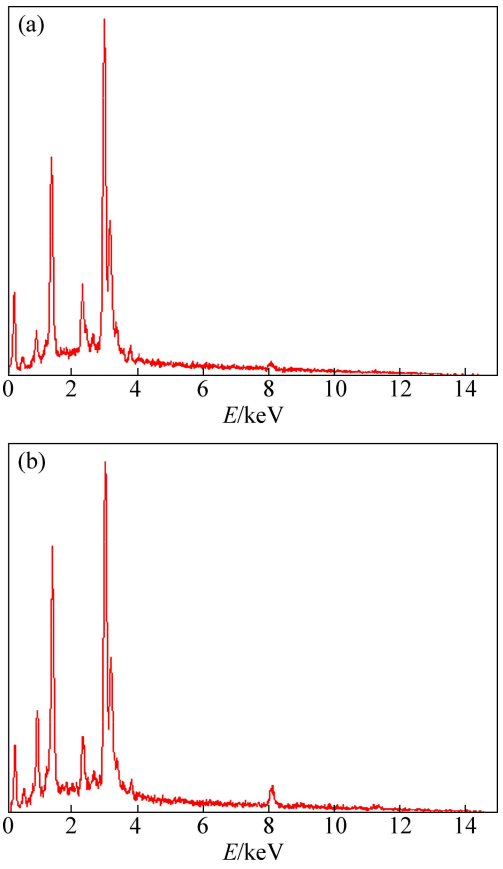

图 5 高铅阳极泥中银及其化合物的能谱

Fig. 5 EDS spectra of silver in high lead anode slime: (a) Ag(Pb)Se; (b) Ag(Cu)Se(S)

银硒、硫酸钡、氧化镍、砷酸铋。阳极泥中的单质铜有两种存在形式，一种是以单体的形式存在的铜颗粒(见图 6(b))，一种是被包裹在氧化镍中，形成的包裹铜(见图 6(c))，需要进行铜镍分离。此外，还发现在高铅铜阳极泥中有黄铜矿存在(见图 6(d))，这是由于工艺中反应不完全造成的。研究表明：高铅铜阳极泥的铜物像中硫酸铜占 81%，铜银硒化合物占 12%，金属铜占 5%，黄铜矿占 2%。阳极泥中铜的物相及其成分复杂，通常会混杂有银、铅、硒、锑等元素(见图 7)。

3.2.4　铅

从 XRF 分析中可以看出，在该铜阳极泥中，铅是重要的贱金属。经物像研究发现，铅主要以硫酸铅，锑酸铅，砷酸铅以及硫化铅的形式存在。分析表明：高铅铜阳极泥的铅物像中硫酸铅占 45.4%，锑酸铅占 18.2%，砷酸铅占 27.3%，硫化铅占 9.1%。其在扫描电镜下的形态以及电子探针能谱如图 8 和 9 所示。

3.2.5　其他有价元素

除了上述物质以外，铜阳极泥中有一些有价元素，例如钯、铂等贵金属，是阳极泥中宝贵的资源。提取分离是十分重要的。研究还发现一定量的氧化镍，砷酸铋，砷酸锑和硫酸钡，流程中需要回收镍、铋、锑和钡(见图 10 和 11)。由于铜阳极泥中含有较多的砷，在阳极泥的处理过程中要严格控制砷的处理，以免对环境造成污染。

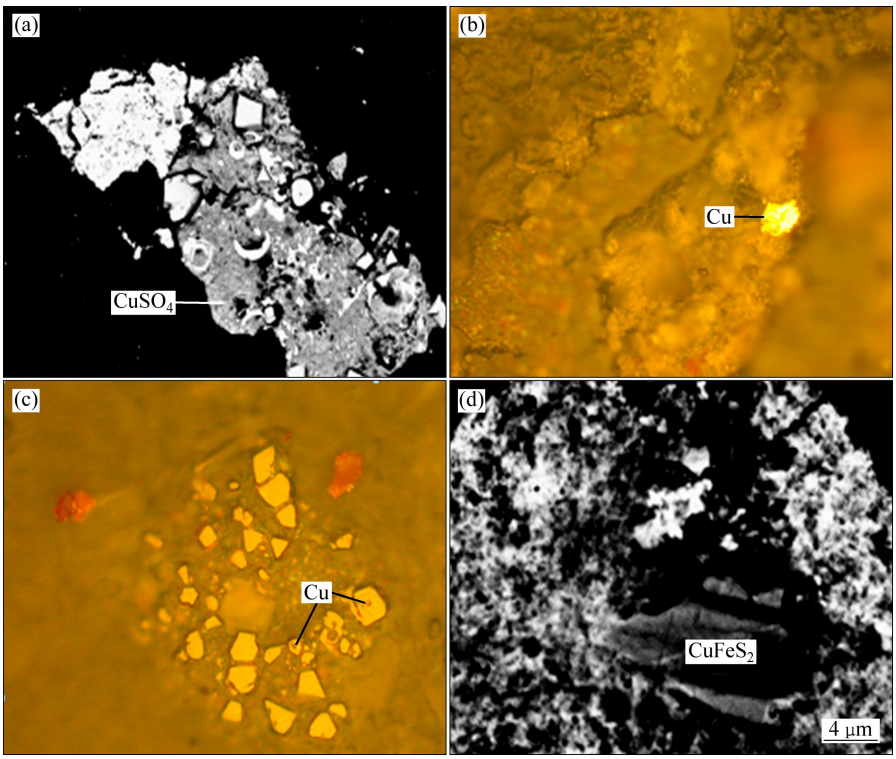

图 6　高铅阳极泥中铜的物像

Fig. 6　Phase of copper in high lead anode slime: (a) $CuSO_4$; (b) Cu; (c) Cu; (d) $CuFeS_2$

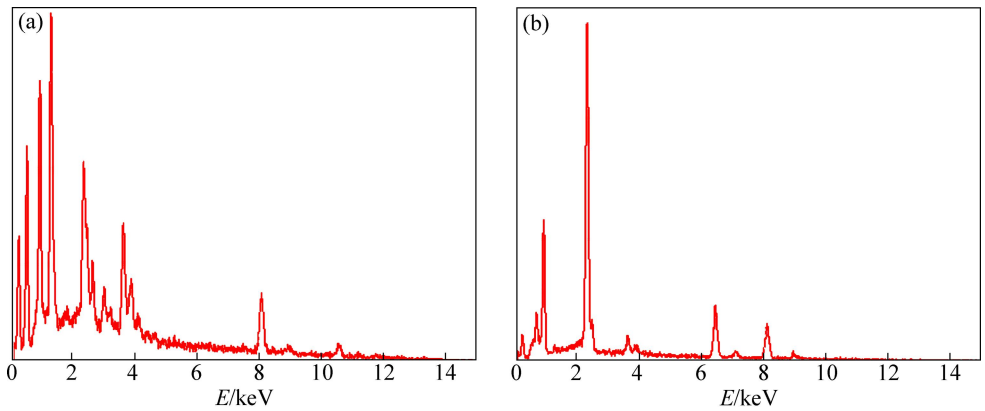

图 7　高铅阳极泥中铜的 EDS 谱

Fig. 7　EDS spectra of copper in high lead anode slime: (a) $CuSO_4$; (b) $CuFeS_2$

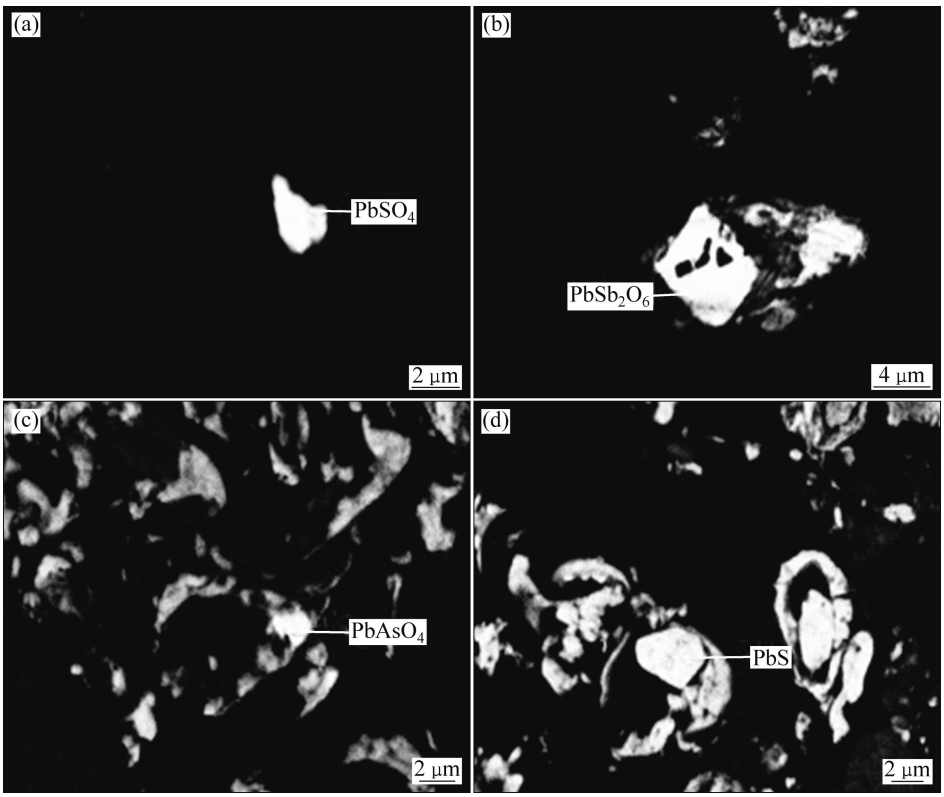

图 8 高铅阳极泥中铅的物相形貌

Fig. 8 Phase morphologies of lead in high lead anode slime: (a) $PbSO_4$; (b) $PbSb_2O_6$; (c) $PbAsO_4$; (d) PbS

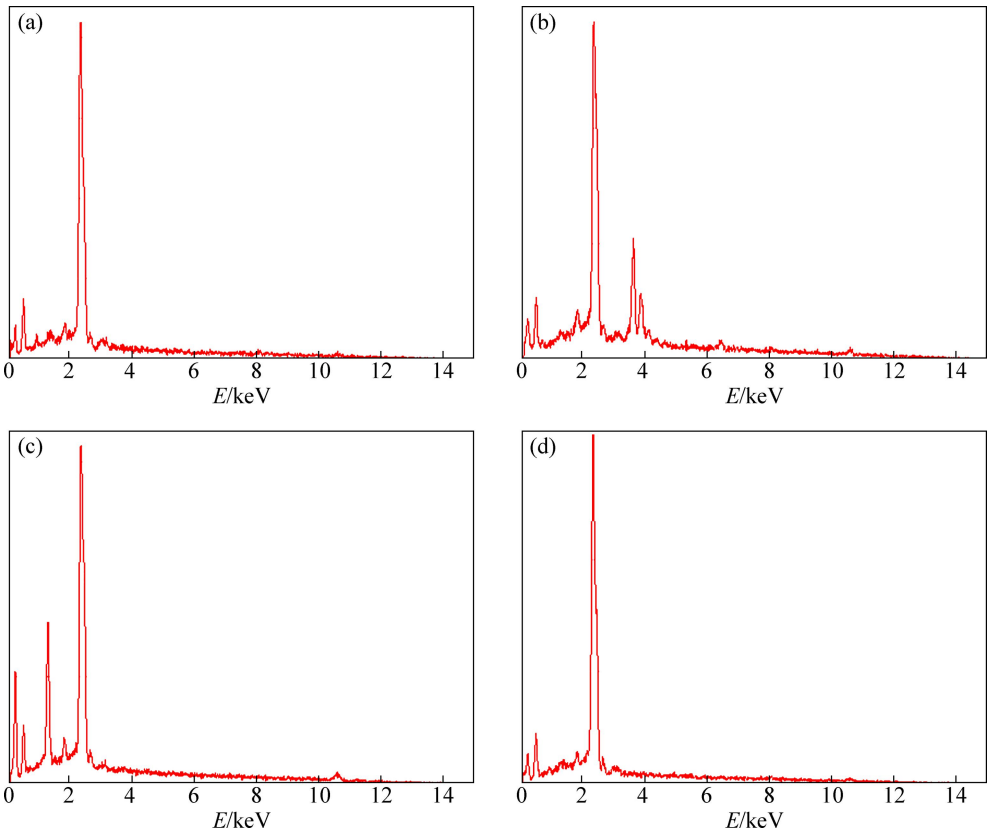

图 9 高铅阳极泥中铅的 EDS 谱

Fig. 9 EDS spectra of lead in high lead anode slime: (a) $PbSO_4$; (b) $PbSb_2O_6$; (c) $PbAsO_4$; (d) PbS

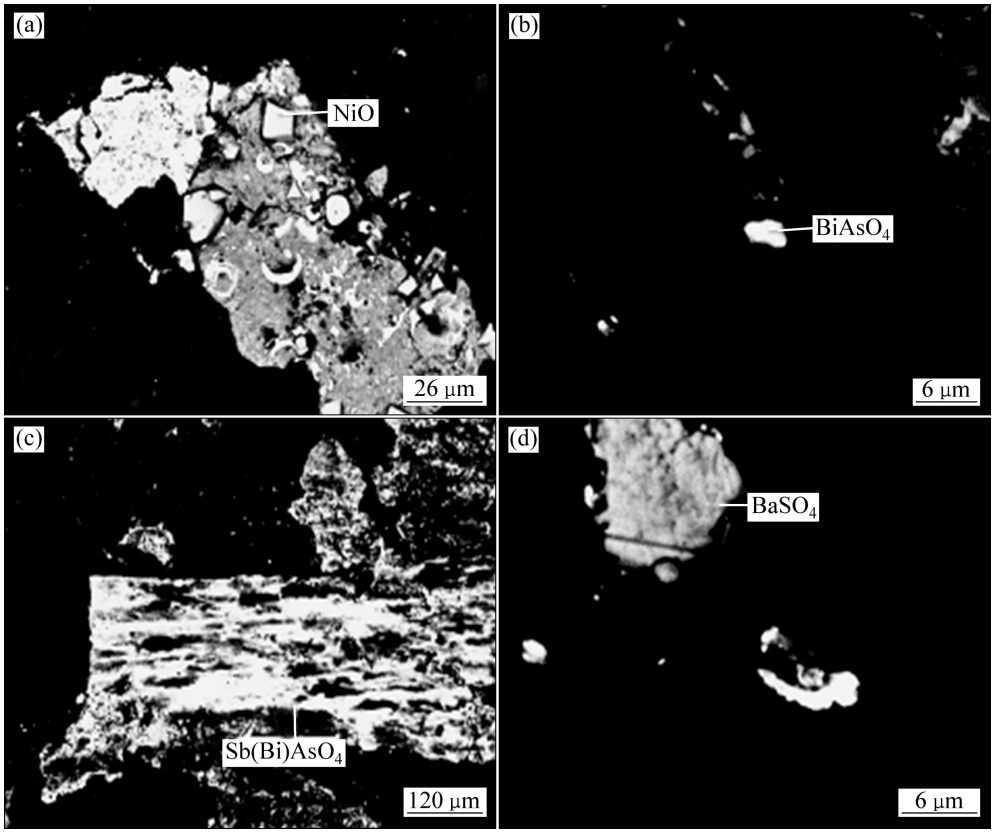

图 10　高铅阳极泥中的其他物相形貌

Fig. 10　Other phase morphologies in high lead anode slime: (a) NiO; (b) $BiAsO_4$; (c) $Sb(Bi)AsO_4$; (d) $BaSO_4$

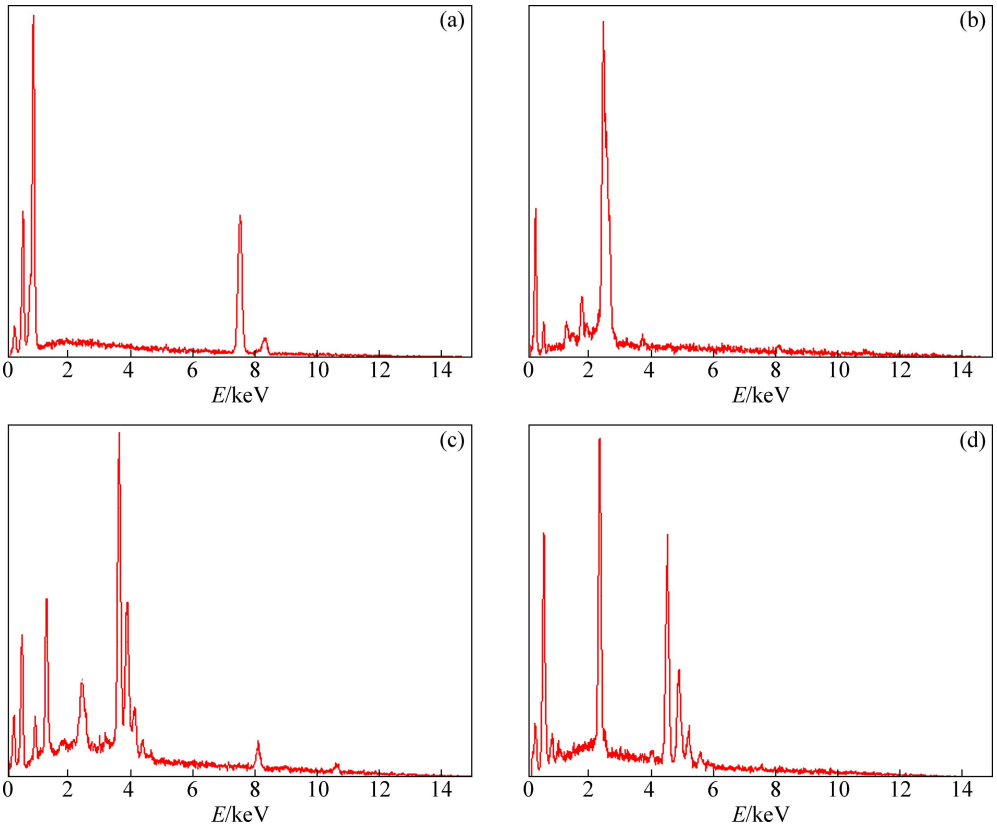

图 11　高铅阳极泥中其他物相的 EDS 谱

Fig. 11　EDS spectra of other phases in high lead anode slime: (a) NiO; (b) $BiAsO_4$; (c) $Sb(Bi)AsO_4$; (d) $BaSO_4$

综上所述，高铅阳极泥中的主要物相包括金及其合金、银化合物、铜及其化合物，铅及其化合物，氧化镍，砷锑铋化合物，硫酸钡等，如表 4 所列。

此外，从结构上看，铜阳极泥常成团状，各物质互相掺杂(见图 12(a))。铜阳极泥以硫酸铜为基底，但是由于阳极泥成分复杂，其基底硫酸铜成分也很复杂，通常在硫酸铜中还会含有硒、锑、银、砷等元素。铜阳极泥中还存在着包裹结构，包括 NiO 包裹铜，$Sb(Bi)AsO_4$ 包裹 $CuFeS_2$(见图 12(b)和(c))。此外，$BaSO_4$ 与 $PbSO_4$ 常常成交互生长结构(见图 12(d))。

由以上的研究发现，高铅铜阳极泥主要特点是贵金属含量较高，金以包裹态存在。贱金属主要包括铅和铜，铅主要以硫酸铅、锑酸铅、砷酸铅以及硫化铅的形式存在。铜以硫酸铜和铜银硒化合物为主，还有微量的金属铜以及黄铜矿的形式存在。硒含量较高，但由于其贵金属银的含量高于硒的，高铅铜阳极泥中的硒为 Ag_2Se、CuAgSe，几乎不存在 Cu_2Se。砷锑铋含量较高。因此，可以采用焙烧蒸硒、酸浸脱铜、硝酸分铅、氨浸分银和氯化分金的方法分别提取铜、铅、银、金。对于锑铋，可以加入适量的盐酸和食盐，使之形成锑与铋的配合物进入溶液，而后利用水解形成

表 4 铜阳极泥中各种金属的赋存状态

Table 4 Metal occurrence state of copper anode slime

Element	Occurrence state
Au	Au、Au-Pb
Ag	Ag_2Se、CuAgSe
Cu	Cu、$CuSO_4$、CuAgSe、$CuFeS_2$
Pb	$PbSO_4$、$PbSb_2O_6$、$PbAsO_4$、PbS
Ni	NiO
Se	Ag_2Se、CuAgSe、Cu_2Se
As	$PbAsO_4$、$BiAsO_4$、Sb AsO_4
Sb	$PbSb_2O_6$、Sb AsO_4
Bi	$BiAsO_4$
Ba	$BaSO_4$
Fe	$CuFeS_2$

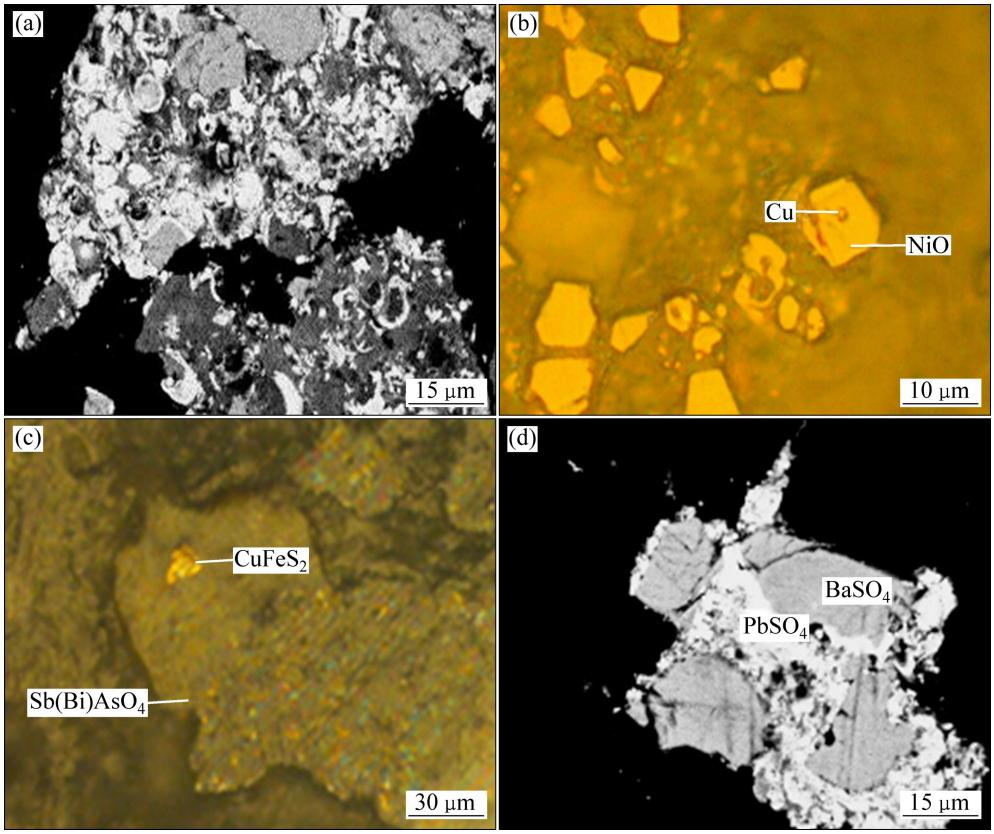

图 12 高铅阳极泥中主要物相的形貌

Fig. 12 Main phase morphologies in high lead anode slime: (a) Anode slime; (b) Cu conformed by NiO; (c) $CuFeS_2$ conformed by $Sb(Bi)AsO_4$; (d) $BaSO_4$ and $PbSO_4$ intergrowth

氯氧锑和氯氧铋而脱除。对于砷，可以与铜阳极泥中脱除的铜形成铜砷碱式盐，以达到治理砷害的目的。

4　结论

1) 高铅铜阳极泥主要元素 Au 0.33%，Ag 9.94%，Cu 16.35%，Pb 13.74%，Se 8.1%。粒度＞35 μm 的占 15.54%，粒度为 10~35 μm 的占 45.95%，粒度＜10 μm 的占 38.71%。

2) 金主要有两种物相：单质金以及金铅合金，其质量比约为 3:1。其粒度大小不均，最大的为 15 μm，最小的为 0.1 μm。单质金常常被包裹在硫酸铜里面。金形态有球形、三角形、长条形和不规则形状；银以硒化银和铜银硒的形式存在 3 种元素混溶形成固溶体。

3) 铜和铅是主要贱金属：铜为硫酸铜、铜银硒、单质铜以及黄铜矿；铅为硫酸铅、锑酸铅、砷酸铅以及硫化铅；砷锑铋化合物主要包括砷酸铅、锑酸铅、砷酸铋、砷酸锑。硫酸铜为基底，氧化镍常包裹单质铜，砷酸锑常包裹黄铜矿，硫酸钡与硫酸铅常交互生长。

REFERENCES

[1] 谢文仕, 李忠生. 铜冶金行业技术现状与发展策略探讨[J]. 有色矿冶, 2007, 23(6): 68−71.
XIE Wen-shi, LI Zhong-sheng. The present situation and the development strategies of copper metallurgy industry technology[J]. Nonferrous Mining & Metallurgy, 2007, 23(6): 68−71.

[2] 黄旺银, 苏庆平. 铜湿法冶金现状及发展趋势[J]. 安徽化工, 2011, 37(2): 13−14.
HUANG Wang-yin, SU Qing-ping. The situation and development of copper hydrometallurgy[J]. Anhui Chemical, 2011, 37(2): 13−14.

[3] 王吉坤, 张博亚. 铜阳极泥现代综合利用技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 12−13.
WANG Ji-kun, ZHANG Bo-ya. The modern comprehensive utilization technology of copper anode slime[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2008: 12−13.

[4] GU Z H, CHEN J, FAHIDY T Z. A study of anodic slime behaviour in the electrorefining of copper[J]. Hydrometallurgy, 1995, 37(2): 149−167.

[5] WANG X W, CHEN Q Y, YIN Z L, XIAO L S. Identification of arsenato antimonates in copper anode slimes[J]. Hydrometallurgy, 2006, 84: 211−217.

[6] 郑若锋, 刘　川, 秦　渝. 铜镍电解阳极泥中金、铂、钯的提取试验研究[J]. 黄金, 2004, 25(6): 37−41.
ZHENG Ruo-feng, LIU Chuan, QIN Yu. The research of extracting Au, Pt, Pd from copper and nickel anode slime[J]. Gold, 2004, 25(6): 37−41.

[7] DONMEZ B, SEVIM F, COLAK S. A study on recovery of gold from decopperized anode slime[J]. Chemical Engineering & Technology, 2001, 24: 1.

[8] 郑雅杰, 汪　蓓. 铜阳极泥预处理富集金银的研究[J].中南大学学报: 自然科学版, 2010, 41(3): 865−870.
ZHENG Ya-jie, WANG Pei. The research of pretreating Copper anode slime to enrich gold and silver[J]. Journal of Central South University: Natural Science, 2010, 41(3): 865−870.

[9] ANTIPOV N I, TARASOV A V. Hydrometallurgical methods of recycling interelectrode slime[J]. Metallurgist, 2002, 46: 229−233.

[10] 郭学益, 肖彩梅, 钟菊芽, 田庆华. 铜阳极泥处理过程中贵金属的行为[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(5): 991−998.
GUO Xue-yi, XIAO Cai-mei, ZHONG Ju-ya, TIAN Qing-hua. The behavior of noble metal in the treatment of copper anode slime[J]. The Chinese of Nonferrous Metals Society, 2010, 20(5): 991−998.

[11] 柳　青, 王吉坤. 国内主要厂家阳极泥处理工艺流程改进状况[J]. 南方金属, 2008, 2: 25−27.
LIU Qing, WANG Ji-kun. The improvement status of anode slime treatment process in China[J]. Southern Metals, 2008, 2: 25−27.

[12] 王　玮, 唐尊球, 陈晓东. 论金川集团有限公司原生铜精矿及二次铜精矿所产阳极泥处理工艺[J]. 有色冶金设计与研究, 2002, 23(3): 16−20.
WANG Wei, TANG Zun-qiu, CHEN Xiao-dong. The technology of the treatment of the anode slime of the primary copper concentrate and secondary copper concentrate in Jinchuan[J]. Nonferrous Metals Engineering & Research, 2002, 23(3): 16−20.

[13] 周乐光. 工艺矿物学[M]. 北京: 冶金工艺出版社, 1990: 5−30.
ZHOU Le-guang. Process mineralogy[M]. Beijing: Metallurgical Technology Press, 1990: 5−30.

[14] NORMAN O L. Modern process mineralogy: An integrated multi-disciplined approach to flowsheeting[J]. Minerals Engineering, 2011, 24: 1229−1237.

[15] 都安治. 伴生金的工艺矿物学研究方法[J]. 矿物学报, 2001,

21(3): 528−530.
DU An-zhi. The process mineralogy research methods of associated gold[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2001, 21(3): 528−530.

[16] CABRI L J, BEATTIE M, RUDASHEVSKY N S, RUDASHEVSKY V N. Process mineralogy of Au, Pd and Pt ores from the Skaergaard intrusion[J]. Minerals Engineering, 2005, 18: 887−897.

[17] 杨洪英, 杨　立, 佟琳琳, 范有静. 广西金牙难浸金矿的工艺矿物学研究[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2007, 28(8): 1156−1158.
YANG Hong-ying, YANG Li, TONG Lin-lin, FAN You-jing. Process mineralogy of refractory gold ore in Jinya, Guangxi Province[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science, 2007, 28(8): 1156−1158.

[18] 汤集刚, 韩至成. 锰阳极泥的工艺矿物学及杂质的脱除研究[J]. 矿冶, 2005, 14(3): 75−78.
TANG Ji-gang, HAN Zhi-cheng. Investigation on process mineralogy of manganese anode slime and impurity removal[J]. Mining & Metallurgy, 2005, 14(3): 75−78.

[19] PANGUM L S, GLATTHAAR J W, MANLAPIG E V. Process mineralogy of fluorosilicate minerals in ok tedi ores[J]. Miner & Engineering, 2011, 12: 1619−1628.

[20] DONMEZ B, EKINCI Z, CELIK C, COLAK S. Optimisation of the chlorination of gold in decopperized anode slime in aqueous medium[J]. Jydrometallurgy, 1999, 52: 81−90.

(编辑　李艳红)