

## 焙烧氰化尾渣中金、银和铁的回收利用研究进展

边振忠<sup>1</sup>, 傅平丰<sup>1,2\*</sup>, 李振宇<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083; 2. 金属矿山高效开采与安全教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 焙烧氰化尾渣是黄金生产排放的一类危险固体废物, 其中的金、银和铁等有价金属元素仍可作为二次资源利用。系统总结了国内外在回收焙烧氰化尾渣中金、银和铁的研究进展, 分析了磁化焙烧法、硫脲浸出法、氯化浸出法、高温氯化焙烧法、强酸预浸-氯化浸出法、直接还原焙烧法和细磨法在资源综合回收利用中的优缺点, 指出焙烧氰化尾渣的资源化、减量化和无害化的发展方向。

**关键词:** 冶金技术; 焙烧氰化尾渣; 金; 银; 铁; 综合回收

**中图分类号:** TD953 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0676(2017)03-0088-05

### Research Progress of Recycling Gold, Silver and Iron from Roasted Cyanide Tailings

BIAN Zhenzhong<sup>1</sup>, FU Pingfeng<sup>1,2\*</sup>, LI Zhenyu<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. State Key Laboratory of High-Efficient Mining and Safety of Metal Mines, Ministry of Education, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Roasted cyanide tailings (RCTs) are the hazardous solid wastes discharged in the gold production. Due to a large amount of remained valuable elements such as gold, silver and iron, RCTs are considered as the recyclable secondary resources. The research progress in the recycling of gold, silver and iron from the RCTs around the world has been systematically summarized in the present paper. The recycling techniques include magnetic roasting, thiourea leaching, chloridizing leaching, high-temperature chloridizing roasting, acid leaching followed by cyanidation leaching, direct reduction roasting and ultra-fine grinding. Both the advantages and disadvantages of the reported processes were discussed in the comprehensive utilization of RCTs. The trend for recycling, reduction and detoxification of RCTs was proposed.

**Key words:** metallurgy; roasted cyanide tailings; gold; silver; iron; comprehensive utilization

氰化尾渣是氰化法提取金银后产生的固体废物, 含有一定量的金、银等贵金属及铅、锌、铜、铁等贱金属, 部分氰化尾渣还含有稀土金属, 但氰化尾渣残留有大量氰化浸出剂和砷、铅等重金属, 给生态环境带来巨大的风险<sup>[1-2]</sup>。氰化尾渣是国家危险废物名录中的无机氰化固体废物, 需严格按照危险废物处置要求进行管理与处理。

目前我国黄金产量已居世界首位, 黄金生产带来巨量的氰化尾渣, 据不完全统计, 我国黄金冶炼企业年排放氰化尾渣量已超过 2450 万吨<sup>[3]</sup>, 截止

2011年, 氰化尾渣累计堆存量达 1.2 亿吨以上。氰化尾渣属于危险固废, 其堆存、运输、处置等管理环节要求严格, 给企业带了巨大的环保、经济及社会压力; 同时氰化尾渣中含有一定量有价金属, 具有资源属性, 因此, 开展氰化尾渣的清洁利用, 提取有价金属, 消减其堆存量, 实现无害化, 对黄金生产行业走可持续发展道路具有重大意义。本文就国内外提取焙烧氰化尾渣中金、银和铁的研究成果进行综述。

收稿日期: 2017-04-24

第一作者: 边振忠, 男, 硕士研究生, 研究方向: 工业固体废弃物资源化利用。E-mail: bzhenzhong@163.com

\*通讯作者: 傅平丰, 男, 博士, 副教授, 研究方向: 贵金属选冶及矿业环境污染控制。E-mail: pffu@ces.ustb.edu.cn

## 1 氰化尾渣的分类与性质

根据氰化浸出工艺的不同,我国黄金生产企业排放的氰化尾渣主要有以下4类:1)焙烧氰化尾渣,指金精矿经氧化焙烧-氰化浸出后形成的尾渣,俗称红渣,此类尾渣占氰化尾渣总量50%以上,是堆存的主要氰化尾渣;2)全泥氰化尾渣,指金矿石经全泥氰化浸出后产生的尾渣,一般金银品位较低;3)金精矿氰化尾渣,指金精矿直接氰化浸出后产生的尾渣,因金精矿含有影响金银浸出的有害元素,如硫、砷、铜等,此类尾渣的金银品位较高;4)其它氰化尾渣,指金精矿经生物氧化、加压氧化等预处理氰化浸出所得尾渣,此类尾渣的量相对较小。

焙烧氰化尾渣中硫、砷和铜含量较低,主要有价金属为金、银和铁,TFe含量约30%,金品位为1~3 g/t,部分尾渣金品位达7 g/t以上,银品位为25~90 g/t<sup>[4-6]</sup>。焙烧氰化尾渣中铁主要以赤铁矿存在,含有少量磁铁矿和黄铁矿。非金属矿物的种类和含量与金精矿中脉石有关,多为石英、长石等硅酸盐物。焙烧氰化尾渣中金银多被包裹于赤铁矿和石英等矿物中,结构复杂,暴露率低,尾渣粒度细,泥化现象严重,若直接氰化浸出,金银浸出率很低<sup>[5-6]</sup>。

焙烧氰化尾渣的综合利用率较低,目前多为水泥生产的添加料,提取金、银和铁等有价金属的工程实践很少,相关研究多处于实验室或半工业试验阶段。

## 2 焙烧氰化尾渣中金、银和铁的回收方法

### 2.1 磁化焙烧法

焙烧氰化尾渣中金、银多被赤铁矿等矿物包裹,暴露率低。通过磁化焙烧,赤铁矿被还原成磁铁矿,改变载金、银矿物的化学成分及晶格结构,能有效破坏金银与矿物间相互包裹、镶嵌的复杂结构,增加被包裹金银的暴露率,加大金银与浸出剂的接触机率,提高金银的浸出率<sup>[7-8]</sup>。此外,磁化焙烧后赤铁矿被还原成强磁性的磁铁矿,磁选法可从焙烧氰化尾渣中回收铁精粉。

#### 2.1.1 磁化焙烧-氰化浸出金银

磁化焙烧有利于暴露被包裹金银,为氰化浸出创造条件。张亚莉等<sup>[5]</sup>将焙烧氰化尾渣用高炉煤气还原焙烧,磁选后将尾矿氰化浸出,金回收率约50%;此尾渣中的金多分布于硅酸盐矿物中,焙砂

磁选后金被富集于尾矿中,有利于氰化浸金。Liu等<sup>[8]</sup>将焙烧氰化尾渣与焦粉混合,750℃下磁化焙烧75 min,焙砂氰化浸出,金的浸出率可提高到46.14%。郑雅杰等<sup>[9]</sup>采用磁化焙烧-酸浸-氰化浸金工艺,磁化焙烧将尾渣中赤铁矿等还原,再用硫酸浸出铁,彻底破坏金银与磁铁矿等矿物的包裹关系,酸浸渣经600℃氧化焙烧脱炭,再氰化浸出,金浸出率达92.4%。磁化焙烧可破坏金银的包裹状态,提高金银浸出率,但若以酸浸预处理将包裹金银的磁铁矿彻底溶解破坏,则工艺太过复杂,成本较高。

#### 2.1.2 磁化焙烧-磁选回收铁

磁化焙烧后尾渣中赤铁矿转化成磁铁矿,磁选可获得铁精粉。尚德兴等<sup>[10]</sup>以褐煤为还原剂,将氰化尾渣于800℃下焙烧50 min,磁选可得TFe品位59%、回收率80%的铁精粉。谢建宏等<sup>[11]</sup>以TFe含量38.94%的焙烧氰化尾渣为原料,添加无烟煤于850℃下焙烧35 min,磨矿磁选后可获TFe品位55.46%、回收率76.73%的铁精矿。但研究表明,焙烧氰化尾渣经磁化焙烧-磁选难以获得TFe>60%的铁精矿,铁回收率也较低。张亚莉等<sup>[12]</sup>从热力学角度分析了氰化渣磁化焙烧时铁化合物的反应行为,认为当氰化尾渣中CaO/SiO<sub>2</sub>比例不合适时,Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>会与生成的2CaO·SiO<sub>2</sub>反应转化成2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,且焙烧过程中CO会促进还原产物Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>与SiO<sub>2</sub>反应生成2FeO·SiO<sub>2</sub>,此类含铁杂质会与Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>被一同选出,降低铁精粉TFe品位。Zhang等<sup>[13-14]</sup>研究了添加钠盐磁化焙烧-水浸-磁选处理含铝高硅氰化尾渣。焙烧过程中钠盐与硅、铝反应生成水溶性盐,破坏了生成2CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和2FeO·SiO<sub>2</sub>等杂质的反应条件;水浸法除去水溶性产物,与原始尾渣相比,水浸渣中硅和铝含量分别下降31.5%和70.6%,磁选后可得TFe品位59.11%、回收率为76.12%的铁精粉。

### 2.2 硫脲浸出法

硫脲浸金是一种很有前景的非氰浸出方法。在酸性介质中,以Fe<sup>3+</sup>为氧化剂,金可与硫脲生成稳定的络合物([Au(SCN<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)<sub>2</sub>]<sup>+</sup>)而被浸出。硫脲法溶金速度快,硫脲可再生利用,其选择性比氰化浸出好,可用于焙烧氰化尾渣中金的浸出<sup>[15]</sup>。

于先进等<sup>[16]</sup>以招远某焙烧氰化尾渣为原料,采用硫脲法浸金,在液固比3:1、浸出温度60℃、浸出时间6 h、pH=1~1.5及硫脲用量为2 kg/t的条件下,金浸出率达到82.3%。专利“金氰化尾渣焙烧-超声波强化硫脲浸金-活性炭富集的提金方法”,提

到将尾渣先在 650℃焙烧 3 h 活化,焙砂在常温下用硫脲法浸出,搅拌时以超声辅助强化金的浸出,金浸出率达 80.5%<sup>[17]</sup>。硫脲法浸出速度快,但硫脲用量大,浸出成本高,而尾渣金品位低(1~3 g/t),需要考虑硫脲提金法的经济效益。此外,硫脲法多在较强酸性(pH=1~2)介质中浸金,浸出矿浆温度较高(50℃左右),若氰化尾渣中残留有氰化物,氰化物在酸性环境中会转化成易挥发的剧毒氰化氢气体,给现场作业人员带来巨大安全隐患。

### 2.3 氯化浸出法

氯化浸出法(亦称液氯法)是在含有氯化钠等氯化物的水溶液中加入次氯酸盐,形成 Au-H<sub>2</sub>O-Cl 体系。次氯酸盐能氧化包裹金的硫化物,如砷黄铁矿、黄铁矿等,使金暴露,生成可溶性金氯络合离子而被浸出。

氯化浸出法可用于焙烧氰化尾渣的堆浸提取金银。专利“一种高效回收低品位废渣中金银的方法”提到先将氰化尾渣与水泥等粘结剂混合造球,再于回转窑中 700~800℃焙烧活化,筑堆喷淋高效氯盐浸出剂和释氧剂 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>,堆浸 7~10 天后,金和银的浸出率分别达 75%和 50%<sup>[18]</sup>。专利“焙烧-氰化含金尾渣中有价金属综合回收工艺”提到以盐酸、氯气和次氯酸钠为浸出剂,氯化浸出金银,并将尾渣中砷、铅和铁最大限度浸出,金和银的浸出率大于 90%,活性炭吸附回收金银,再纯化回收铅与铁<sup>[19]</sup>。氯化浸出法虽然原料成本较低、金银浸出率高,但含氯溶液腐蚀性强,设备抗腐蚀性要求极高。

### 2.4 高温氯化焙烧法

高温氯化焙烧法处理氰化尾渣的温度多为 1000~1200℃,以 NaCl、CaCl<sub>2</sub> 为氯化剂,将尾渣与氯化剂混合、造球,干燥后再高温氯化挥发,金、银与 Cl<sub>2</sub> 或 HCl 反应后形成易挥发的氯化物,进入气相中被收集。

韦其晋等<sup>[20]</sup>以贵州某焙烧氰化尾渣为原料,1100℃下氯化焙烧 1 h 后,尾渣中金含量从 5.2 g/t 降至 0.48 g/t,金挥发率为 90.77%。刘大学等<sup>[21]</sup>以青海滩涧的焙烧氰化尾渣为原料,采用高温氯化法回收金银,1200℃下氯化焙烧 1 h 后,金、银的挥发率分别达 89.57%和 53.46%,取得良好效果。高温氯化过程中若加入还原剂,能同时实现金银氯化挥发和铁化合物的还原焙烧,焙砂经磨矿-磁选可得铁精粉。李正要等<sup>[22]</sup>以氯化挥发-还原焙烧一步法处理河南某焙烧氰化尾渣,添加烟煤后于 1000℃下氯化焙烧 80 min 后,金的挥发率达 85.19%,焙砂经

磨矿-磁选后,获得 TFe 品位 74.16%、回收率 87.75% 的铁精粉。

### 2.5 强酸预浸-氰化浸出法

焙烧氰化尾渣中金银多被铁氧化物所包裹,以硫酸、硝酸等酸化浸出氰化尾渣中的铁,可有效破坏铁氧化物对金银的包裹,使尾渣大幅减重,提高酸浸渣中金银品位,浸酸液的主要成分为 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 或 Fe(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>,经纯化后可制备成铁盐或铁红颜料,实现了尾渣中金、银和铁的综合利用。

酸化浸出工艺中硫酸过量系数为 1~4,反应温度约 100℃,反应时间为 2~4 h。张福元等<sup>[23]</sup>以酸浸-氰化工艺回收某焙烧氰化尾渣中的金银,在矿浆浓度 35%、硫酸过量系数 1.3、反应温度 100℃和反应时间 2.5 h 下酸浸,铁浸出率达 97.8%,酸浸渣再氰化浸出,金与银的浸出率分别达 87%和 80%。Dang 等<sup>[24]</sup>以酸浸-氰化工艺处理某焙烧氰化尾渣,硫酸浸出后,铁浸出率达 78.92%,酸浸渣氰化浸出,金浸出率达 88.57%。Li 等<sup>[25]</sup>以某焙烧氰化尾渣为原料,80~85℃下硝酸浸出铁,酸浸液以 NH<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O 除杂,用尿素沉淀法制备出粒径为 50~70 nm 的 α-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纳米铁红颜料。

酸浸预处理可破坏铁氧化物对金银的包裹,提高金银浸出率,但存在以下问题:1) 硫酸用量大,成本高,酸浸温度约 100℃,浸出条件较苛刻,设备腐蚀严重;2) 酸浸出液中杂质含量高,强酸溶解铁氧化物的同时,尾渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、MgO 及重金属元素也被浸出,酸浸液中 Fe<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> 纯度低,需用复杂的除杂工艺来纯化;3) 若焙烧氰化尾渣残留有氰化物,氰化物遇到酸即生成易挥发 HCN,酸浸过程极易造成剧毒氰化氢气体的释放。

### 2.6 直接还原焙烧法

焙烧氰化尾渣中铁氧化物经直接还原焙烧后被还原成金属铁。依据贱金属捕集贵金属的机理,尾渣中金和银会被原位生成的液态金属铁所捕集,经磁选得到含金和银的还原铁粉,金银得到富集,再以强酸溶解还原铁粉,制取得到硫酸亚铁,酸浸渣再氰化浸出金银。

专利“一种金精矿焙烧氰化后的尾渣中金银的回收方法”提到以 900~1200℃直接还原焙烧,磁选得到富集金银的金属铁粉,稀酸溶出得到硫酸亚铁,经蒸发结晶得到 FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 化工产品,酸溶渣氰化浸出金银,金和银的浸出率均超过 70%<sup>[26]</sup>。专利“一种含铁金矿氰化尾矿同步回收金和铁以及钴或镍的方法”提到在 1050~1300℃下直接还原焙烧,

金、钴和镍被同步富集到金属铁粉中, 将磁选铁精粉稀硫酸浸出, 钴和镍的浸出率超过 60%, 铁浸出率约 83%, 酸浸液分离纯化得含铁、钴和镍的化工产品, 浸渣再氰化浸出, 金浸出率大于 75%<sup>[27]</sup>。

### 2.7 细磨法

焙烧氰化尾渣中的金银多呈严重包裹状态, 通过细磨减小载金银矿物的尺寸, 可增加金银的暴露率, 再次氰化浸出时可提高金银的浸出率。

薛光等<sup>[28]</sup>以加添加剂再磨-除杂-氰化浸出工艺处理某焙烧氰化尾渣, 尾渣加添加剂后再磨至-400目大于 95%, 除去尾渣中的砷, 再用 30%除杂剂加热浸取杂质, 除去金银表面的钝化膜, 氰化浸出后金、银的浸出率分别达 65.0%和 41.49%。Celep 等<sup>[29]</sup>将某银浸渣以立式搅拌磨超细磨矿, 当此浸渣的  $d_{80}$  由 100  $\mu\text{m}$  降至 1.2  $\mu\text{m}$  时, 氰化浸出银的浸出率由 36%增加到 84%, 大幅提高浸渣中银的浸出率。超细磨能耗大, 成本高, 当尾渣的金银品位较低时, 经济合理性需要考虑。

## 3 展望

焙烧氰化尾渣是氰化尾渣中堆存量最大的一类危险固体废物, 给企业造成了巨大的环保、安全和经济压力, 焙烧氰化尾渣含有金、银和铁等有色金属元素, 是宝贵的二次资源。目前, 焙烧氰化尾渣综合利用的研究报道较多, 但能转化成工业应用的例子较少; 此外, 部分研究仍采用氰化浸出工艺从尾渣中回收金银, 必然会形成二次氰化尾渣。因此, 今后在提取尾渣中有价金属时, 须特别强调处理工艺的清洁性和环境友好性, 需考虑采用非氰浸出工艺回收金银, 实现焙烧氰化尾渣的资源化、减量化和无害化。

### 参考文献:

- [1] MUDDER T I, BOTZ M M. Cyanide and society: a critical review[J]. The European journal of mineral processing and environmental protection, 2004, 4(1): 62-74.
- [2] DONATO D B, NICHOLS O, POSSINGHAM H, et al. A critical review of the effects of gold cyanide-bearing tailings solutions on wildlife[J]. Environment international, 2007, 33(7): 974-984.
- [3] 朱磊, 康广风, 李淑芬, 等. 氰化尾渣多元素资源化回收技术研究[J]. 环境科技, 2010, 23(2): 5-8.  
ZHU L, KANG G F, LI S F, et al. Research on multi-element resources of utilizing cyaniding tailings[J]. Environment science and technology, 2010, 23 (2): 5-8.
- [4] 李绍卿, 王静, 刘香梅, 等. 从氰化尾渣中回收金的氰化工艺研究[J]. 黄金, 2004, 25(10): 37-39.  
LI S Q, WANG J, LIU X M, et al. Study on cyanide processes to recovery gold from cyanide tailings [J]. Gold, 2004, 25 (10): 37-39.
- [5] 张亚莉, 于先进, 张丽鹏, 等. 高铁氰化渣湿法处理的研究进展及工艺开发[J]. 山东冶金, 2010, 32(5): 3-5.  
ZHANG Y L, YU X J, ZHANG L P, et al. Research progress on hydrometallurgical treatment of cyanide tailings with high iron content and process development [J]. Shandong metallurgy, 2010, 32(5): 3-5.
- [6] 王君, 陈为亮, 焦志亮, 等. 从氰化尾渣中回收金、银的研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2014(4): 54-58.  
WANG J, CHEN W I, JIAO Z L, et al. Research progress on recovering gold and silver from cyanide residues[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2014(4): 54-58.
- [7] BAS A D, SAFIZADEH F, GHALI E, et al. Leaching and electrochemical dissolution of gold in the presence of iron oxide minerals associated with roasted gold ore[J]. Hydrometallurgy, 2016, 166: 143-153.
- [8] LIU B L, ZHANG C H, LI L B, et al. Recovery of gold and iron from the cyanide tailings by magnetic roasting[J]. Rare metal materials and engineering, 2013, 42(9): 1805-1809.
- [9] 郑雅杰, 龚昶, 孙召明. 氰化尾渣还原焙烧酸浸提铁及氰化浸金新工艺[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9): 2426-2433  
ZHENG Y J, GONG C, SUN S M. New technology of iron extraction and gold recovery from cyanide tailings by cyanide process after reduction roasting and acid leaching[J]. The Chinese journal of nonferrous metals, 2014, 24(9): 2426-2433.
- [10] 尚德兴, 陈芳芳, 张亦飞, 等. 还原焙烧-磁选回收氰化尾渣中铁的试验研究[J]. 矿冶工程, 2011, 31(5): 35-39.  
SHANG D X, CHEN F F, ZHANG Y F, et al. Recovery of iron from gold-cyanide residue by reduction roasting and magnetic separation[J]. Mining and metallurgical engineering, 2011, 31(5): 35-39.
- [11] 谢建宏, 张崇辉, 李慧, 等. 某焙烧氰化尾渣综合利用试验研究[J]. 金属矿山, 2011(1): 150-153.  
XIE J H, ZHANG C H, LI H, et al. Experimental researches on comprehensive utilization of roasting-cyanided tailings[J]. Metal mine, 2011(1): 150-153.
- [12] 张亚莉, 于先进, 李小斌, 等. 氰化渣磁化焙烧过程中铁化合物反应行为的热力学分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2011, 42(12): 3623-3629.  
ZHANG Y L, YU X J, LI X B, et al. Thermodynamics analysis of ferric compound during roasting-preparing

- process of cyanide tailings[J]. Journal of Central South University (Science and technology), 2011, 42(12): 3623-3629.
- [13] ZHANG Y L, LI H M, YU X J. Recovery of iron from cyanide tailings with reduction roasting-water leaching followed by magnetic separation[J]. Journal of hazardous materials, 2012, 213: 167-174.
- [14] ZHANG Y L, LI H M, YU X J. Fe extraction from high-silicon and aluminum cyanide tailings by pretreatment of water leaching before magnetic separation[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2013, 23(4): 1165-1173.
- [15] ZHANG J T, SHEN S B, CHENG Y, et al. Dual lixiviant leaching process for extraction and recovery of gold from ores at room temperature[J]. Hydrometallurgy, 2014, 144: 114-123.
- [16] 于先进, 李怀梅, 张亚莉. 氰化尾渣硫脲浸金试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(5): 30-33.  
YU X J, LI H M, ZHANG Y L. Experimental study on gold-leaching from cyaniding tailing with thiourea[J]. Nonferrous metals (Extractive metallurgy), 2012(5): 30-33.
- [17] 王建英, 张雪峰, 许世伟, 等. 氰化尾渣焙烧-超声波强化硫脲浸金-活性炭富集的提金方法: CN201210174 909.X[P]. 2012-09-19.  
WANG J Y, ZHANG X F, XU S W, et al. Roasting-ultrasonic enhanced thiourea leaching-activated carbon enrichment of gold from cyanide tailings: CN201210174 909.X[P]. 2012-09-19.
- [18] 徐永祥, 吕寿明, 梁志伟, 等. 一种高效回收低品位废渣中金银的方法: CN201410328847.2[P]. 2014-12-10.  
XU Y X, LÜ S M, LIANG Z W, et al. A method for efficient recovery of gold and silver from low grade residue: CN201410328847.2[P]. 2014-12-10.
- [19] 田文学, 苗文胜, 池吉安. 焙烧-氰化含金尾渣中有价金属综合回收工艺: CN201110056552.0[P]. 2011-08-31.  
TIAN W X, MIAO W S, CHI J A. The comprehensive process of recovering valuable metals from roasting-cyanidation gold bearing tailings: CN201110056552.0[P]. 2011-08-31.
- [20] 韦其晋, 袁朝新, 刘大学, 等. 贵州某金矿氰化尾渣氯化挥发回收金试验[J]. 有色金属工程, 2014, 4(3): 45-47.  
WEI Q J, YUAN C X, LIU D X, et al. The experiment of chloridizing volatilization of gold from cyanide tailings in Guizhou gold ore[J]. Nonferrous metals engineering, 2014, 4(3): 45-47.
- [21] 刘大学, 郭持皓, 王云, 等. 青海滩涧山焙烧氰化尾渣回收金银[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(8): 32-35.  
LIU D X, GUO C H, WANG Y, et al. Gold and silver recovery from residue of roasting-cyaniding process in tanjianshan of qinghai [J]. Nonferrous metals (Extractive metallurgy), 2011(8): 32-35.
- [22] 李正要, 王维维, 乐坤. 氰化尾渣氯化挥发-还原焙烧一步法回收金铁[J]. 金属矿山, 2015(10): 173-177.  
LI Z Y, WANG W W, YUE K. Recovering gold and iron from cyanide tailing by one-step process of chloridizing volatilization and reduction roasting[J]. Metal mine, 2015(10): 173-177.
- [23] 张福元, 张玉华. 氰渣综合利用提取金银的试验研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2007, 36(3): 335-338.  
ZHANG F Y, ZHANG Y H. Study on the recovery of gold and silver from cyanide residue[J]. Rare metal materials and engineering, 2007, 36(3): 335-338.
- [24] DANG X E, KE W S, TANG C, et al. Increasing leaching rate of gold cyanide of two-stage calcination generated from refractory ore containing arsenopyrite and pyrrhotite[J]. Rare metals, 2016, 35(10): 804-810.
- [25] LI D X, GAO G L, MENG F L, et al. Preparation of nano-iron oxide red pigment powders by use of cyanided tailings[J]. Journal of hazardous materials, 2008, 155(1): 369-377.
- [26] 任文生, 彭国敏, 俎小凤, 等. 一种金精矿焙烧氧化后的尾渣中金银的回收方法: CN201010277044.0[P]. 2011-01-12.  
REN W S, PENG G M, ZU X F, et al. A method for recovering gold and silver from tailings after oxidation roasting of gold concentrate and cyanidation leaching: CN201010277044.0[P]. 2011-01-12.
- [27] 李浩然, 张士元, 刘鹏伟. 一种含铁金矿氰化尾矿同步回收金和铁以及钴或镍的方法: CN201410455720.7[P]. 2014-12-17.  
LI H R, ZHANG S Y, LIU P W. A method for simultaneous recovery of gold, iron, cobalt or nickel from iron-bearing gold cyanide tailings: CN201410455720.7 [P]. 2014-12-17.
- [28] 薛光, 李先恩. 从焙烧氰化尾渣中回收金、银的试验研究[J]. 黄金, 2012, 33(8): 41-42.  
XUE G, LI X E. Experimental research on gold and silver recovery from roasted cyanidation slags[J]. Gold, 2012, 33(8): 41-42.
- [29] CELEP O, YAZICI E Y. Ultra fine grinding of silver plant tailings of refractory ore using vertical stirred media mill[J]. Transactions of nonferrous metals society of China, 2013, 23(11): 3412-3420.