

# 低品位氧化锌矿的湿法冶金研究进展

夏志美, 陈艺峰, 王宇菲, 王超, 李丽

(湖南工业大学 冶金工程学院, 湖南 株洲 412007)

**摘要:** 低品位氧化锌矿的冶炼是近年的研究重点, 其主要表现为提高低品位氧化锌矿的回收率和降低消耗。常采用酸浸和碱浸2种体系对低品位氧化锌矿进行湿法冶金处理。系统阐述了近几年酸浸和碱浸湿法冶金体系, 并重点分析了较具优势的碱浸体系中的氨浸法冶金工艺。

**关键词:** 氧化锌矿; 低品位; 湿法冶金; 浸出工艺

**中图分类号:** TF111.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2010)06-0009-05

## Development of Treating Low-Grade Zinc Oxide Ore by Hydrometallurgy

Xia Zhimei, Chen Yifeng, Wang Yufei, Wang Chao, Li Li

(School of Metallurgical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

**Abstract:** Hydrometallurgical treatment of low grade zinc oxide ore is recently the key issue in zinc metallurgy, and its aims focus on the increase of resource recovery rate and decrease of energy-consumption. The hydrometallurgical process for treating low grade zinc oxide ore includes acid leaching and alkaline leaching. Discusses systematically development of the two zinc oxide ore treatment processes, and evaluates the advantages of ammonia leaching metallurgical process.

**Keywords:** zinc oxide ore; low-grade; hydrometallurgy; leaching process

## 0 引言

随着锌冶炼工业的发展, 硫化锌矿开始变得枯竭, 人们越来越重视氧化锌矿的开发利用。根据氧化锌的质量分数(品位)划分, 25%~35%的为富矿, 小于25%的为低品位氧化锌矿<sup>[1]</sup>。我国西南地区氧化锌矿资源丰富, 有工业价值的氧化锌矿物有菱锌矿  $ZnCO_3$ 、硅锌矿  $Zn_2SiO_4$ 、异极矿  $Zn_4Si_2O_7 \cdot (OH) \cdot H_2O$ 、水锌矿  $3Zn(OH)_2 \cdot 2ZnCO_3$  和红锌矿  $ZnO$  等。氧化锌矿石中含大量金属杂质, 如铅、铁、镉、铜等, 其矿相很复杂, 很难选别, 且浮选药剂的选择、矿物表面的改性都较困难<sup>[1]</sup>。随着人类对金属材料需求的急剧增加和世界矿产资源的日趋短缺, 使得从低品位矿石中

提取有价金属成为近年来冶金领域的研究热点。

目前主要的锌冶炼工艺有湿法浸出氧化锌矿工艺和火法冶炼工艺。火法炼锌是将含氧化锌的原矿石用碳还原, 从而得到金属锌, 常用蒸馏法炼锌。在蒸馏法炼锌过程中, 先将氧化锌和碳的混合物料加热到 1 373 K 左右, 此时锌蒸汽被还原出来, 再将锌蒸汽引入冷凝器内冷凝为液体锌<sup>[2]</sup>。蒸馏法炼锌方法主要有鼓风炉炼锌、竖罐炼锌、电炉炼锌和平罐炼锌。湿法炼锌过程主要由焙烧、浸出、净化和电解4个工序组成。其实质是稀硫酸和锌焙砂反应生成硫酸锌溶液, 净化除杂后再从净化液中电解析出金属锌, 最后通过熔铸获得锌锭。火法炼锌具能耗高、工艺流程复杂和有价金属综合回收率低等缺点, 而湿法冶炼工艺

收稿日期: 2010-10-08

基金项目: 湖南省教育厅科研基金资助项目(09C341), 湖南工业大学大学生研究性学习和创新性实验计划基金资助项目(湖工大教字[2010]17号)

通信作者: 夏志美(1980-), 女, 湖南攸县人, 湖南工业大学讲师, 中南大学博士研究生, 主要从事有色冶金方面的研究,

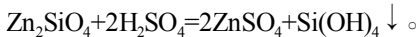
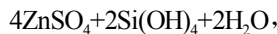
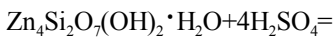
E-mail: zhimei\_x@163.com

具节能、清洁生产优势,符合我国节能减排国策。目前,湿法炼锌工艺大规模生产主要采用常规酸浸方法,氧压酸浸处理硫化锌矿和氨浸处理低品位氧化锌矿正在进行5 000 t/a规模的中试放大研究,因此,笔者拟对低品位锌矿的湿法处理方法体系进行探讨,以期为锌冶炼工业提供一定的理论参考依据。低品位锌矿的湿法处理方法主要有酸性浸出体系和碱性浸出体系。

## 1 酸性浸出体系

### 1.1 常规酸浸

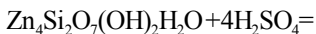
一些文献<sup>[3-11]</sup>报道,采用废电解液浸出氧化锌矿石中的锌时,矿石中的 $\text{SiO}_2$ 易进入浸出溶液并形成胶体,因而既影响了浸出渣的分离速度,又加大了如铁、钙、镁、铝等金属杂质元素的浸出率和分离难度。常规酸浸的反应机理如下:



而用硫酸溶液浸出低品位氧化锌矿时,通过控制矿浆pH值、添加酸量和加酸速度等工艺条件,可得到大于97%的Zn浸出率,而Si和Fe的浸出率可控制在13%和0.84%以内<sup>[3]</sup>。尽管如此,但常规酸浸的工艺效果不尽如人意,存在如酸耗大、浸出液的锌浓度低、浸出液难以净化等缺陷<sup>[12]</sup>。

### 1.2 微波酸浸

在常规酸浸体系中,常采用蒸汽加热方式提高浸出体系温度,但反应体系存在温度梯度,会影响锌的浸出率。已有研究表明,以微波对硅酸锌浸出体系进行加热,在最佳实验条件下,Zn的浸出率为99.08%, $\text{SiO}_2$ 和Fe的浸出率分别为0.30%和0.10%<sup>[13]</sup>。水溶液体系浸出反应机理为:



由于微波加热时的空化作用,物质内部可以同时达到高温,浸出过程中形成的硅胶 $\text{H}_4\text{SiO}_4$ 产生分解,形成固体 $\text{SiO}_2$ ,因此浸出渣过滤性能良好。但由于微波加热设备在工业上大规模应用时难于控制微波泄露,故该方法只停留在实验室阶段。

### 1.3 氧压酸浸

在1.0 MPa压力和120℃温度下,用氧压酸浸高硅低品位氧化锌矿时,控制矿物粒度、硫酸浓度、浸出时间及反应温度等工艺条件,可控制 $\text{SiO}_2$ 的浸出率小于0.8%,而锌浸出率达97%以上<sup>[4]</sup>,由于高温破坏了 $\text{Si}(\text{OH})_4$ 的胶体结构,因而矿浆的过滤性能良好。采用

氧压酸浸工艺处理高硅氧化锌矿,可有效避免硅大量溶出形成 $\text{Si}(\text{OH})_4$ ,改善了渣液分离,但在工业生产上,因反应器的投入较大,且高温提高了常压酸浸难于浸出的金属杂质,所以浸出液的净化难度增大。

### 1.4 两段逆流酸性浸出-萃取-电解

常规酸浸工艺中,为达到既提高金属锌浸出率,同时又降低杂质浸出率和酸耗的目的,采用浸出-萃取-电解工艺,经过破碎、磨矿、浸出、液固分离、萃取、电解等工序,处理低品位氧化锌矿<sup>[15-17]</sup>。此方法常采用两段逆流浸出,即先在终点以pH为5.2~5.5的中性浸出处理矿物,然后以pH为1.5~2.0的酸性浸出处理中性浸出渣的工艺,通过该工艺处理,矿物的总锌浸出率可达92%,且浸出液中Fe、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的质量分数都很低,这有利于锌萃取作业的顺利进行。萃取时,采用有机相为50%的 $\text{P}_2\text{O}_4 + 260 \#$ 煤油3级萃取+2级反萃,得到Zn反萃液;然后将Zn反萃液经活性炭除去有机物后的电解液进行锌电解,所得电解液中,Zn的质量分数高达99.99%,且表面光滑平整。

### 1.5 酸性堆浸

常规釜浸的缺点是渣量大,因此有些研究者采用堆浸工艺处理低品位氧化锌矿。采用酸性堆浸工艺进行处理时,矿石粒度为自然粒度,控制堆积密度和矿堆堆层厚度,间歇喷淋20~32℃的质量浓度为60 g/L的硫酸溶液,喷淋强度为10~12 L/(m<sup>2</sup>·h)<sup>[18]</sup>。为了降低堆浸液中 $\text{Fe}^{2+}$ 的浓度,在喷淋间歇时让空气进入矿堆,以氧化溶液中的 $\text{Fe}^{2+}$ 为 $\text{Fe}^{3+}$ ,水解后滞留堆层,从而降低了堆浸液的处理费用。为使空气能够进入整个矿堆,每天喷淋的闲置时间应达总时间的1/3。喷洒应尽量均匀,控制溶液成细雨滴而不雾化。经过3个多月的浸出后,锌的浸出率可达93.25%,溶液中 $\text{Zn}^{2+}$ 的质量浓度为10~20 g/L, $\text{Fe}^{3+}$ 的质量浓度为0.5~5 g/L。

另外,唐双华等人<sup>[19]</sup>采用硫化胺法对低品位氧化锌矿进行浮选,得到品位为24.52%的锌精矿,即在硫化钠介质中用伯胺作捕收剂浮选氧化锌矿物,再用硫酸浸出锌精矿,锌的浸出率为80.39%。

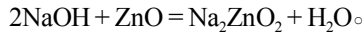
## 2 碱性浸出体系

处理高钙镁或高铁、高铝硅氧化锌矿石时,可采用碱性浸出体系,它能有效降低金属杂质进入溶液,可实现选择性浸出金属锌,得到易分离的矿浆。碱性浸出体系主要有氢氧化钠浸出和氨浸出2个体系<sup>[20-26]</sup>。

### 2.1 氢氧化钠浸出法

刘三军等人<sup>[21]</sup>以锌的质量分数为18.34%的氧化锌矿为原料,开展了氢氧化钠碱法浸出研究。所用矿粉中-200目的矿粒的质量分数占95%,以浓度为5 mol/L的NaOH溶液为浸出剂,在液固质量分数比为10:1,

60℃条件下浸出3h, 得到锌的浸出率为92.5%。具体的反应方程式为:



根据扩散动力学原理, 碱法浸出时所用碱液的浓度越大, 作用的因子越多, 对浸出过程越有利。碱法浸出工艺虽然具有生产成本较低、NaOH可以循环利用的优点, 但由于不能有效脱除溶液中的铅杂质, 目前还停留在实验室研究阶段。

## 2.2 氨浸法

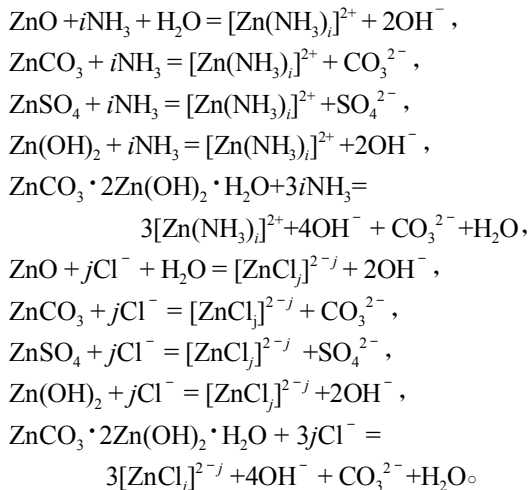
氨浸法是目前国内外研究湿法浸出氧化锌矿中比较成熟的方法, 其浸出液主要有4个体系:  $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系,  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系,  $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系和  $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系。

### 2.2.1 $\text{NH}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系

氧化锌氨浸可发生氨水与 $\text{H}^+$ 的反应、 $\text{Zn}^{2+}$ 与 $\text{OH}^-$ 的络合反应和 $\text{Zn}^{2+}$ 与氨水的络合反应。溶液中无氨存在时,  $\text{Zn}^{2+}$ 与 $\text{OH}^-$ 的配合反应可忽略。 $\text{ZnO}$ 在氨水溶液中的溶解度随氨水浓度和pH的变化而变化, 而当溶液氨浓度为4 mol/L时, 总锌浓度保持在1 mol/L左右。姚耀春等人<sup>[20]</sup>以浓度为4 mol/L的氨水溶液浸出兰坪难选氧化锌矿38 min, 发现锌浸出率达81.89%。

### 2.2.2 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系

在 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系<sup>[2,27-32]</sup>浸出氧化锌矿过程中,  $\text{ZnO}$ 、 $\text{ZnCO}_3$ 和 $\text{ZnSO}_4$ 等物料与 $\text{NH}_3$ 及 $\text{Cl}^-$ 生成锌氨和锌氯配合物, 其反应机理如下:



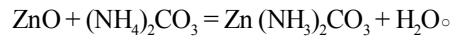
式中:  $i, j=1, 2, 3, 4$ 。

在 $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ 体系浸出氧化锌矿过程中, 矿物中的Cu, Cd, Co, Ni, Pb, Ca, Mg等杂质元素部分或全部溶解进入溶液, Fe, Mn等元素直接留在矿渣中。通过溶液循环提高浸出液中 $\text{Zn}^{2+}$ 浓度, 在优化工艺条件下, 锌浸出率可达98.47%, 浸出液中 $\text{Zn}^{2+}$ 平均质量浓度为37.37 g/L<sup>[2]</sup>。

### 2.2.3 $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系

$\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{CO}_3\text{-H}_2\text{O}$ 体系<sup>[21, 33]</sup>浸出氧化锌矿是以

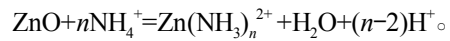
$(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ 为浸出剂, 液固体质量分数比为15:1、浸出剂浓度为5 mol/L的条件下浸出低品位锌矿, 具体反应方程式为:



该浸出体系要求液固比较高, 而浸出液 $\text{Zn}^{2+}$ 含量较低, 且氨水为易挥发性物质, 从生产环境考虑, 浸出过程温度不宜过高。本体系浸出矿物时, 若浸出剂的浓度为5 mol/L, 温度为25℃, 浸出液的液固质量分数比为15:1, 则 $\text{ZnO}$ 的浸出率可达91.3%<sup>[33]</sup>。

### 2.2.4 $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系

在以 $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系<sup>[34-36]</sup>为浸出液浸出氧化锌矿过程中, 氧化锌矿中的锌将以 $\text{Zn}(\text{NH}_3)_n^{2+}$ 的形式进入浸出液, 其反应方程式为:



本体系浸出氧化锌矿的方法中, 主要利用不同温度下Zn在 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 中的溶解度不同, 先在高温下将 $\text{ZnO}$ 矿浸入溶液, 然后降温冷却, 使 $\text{Zn}^{2+}$ 呈与 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 结合成溶解度很低的复盐析出, 然后回收。已有研究表明: 浸出温度和硫酸铵浓度显著影响锌的浸出率。 $\text{NH}_3\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系浸出氧化锌矿的最佳条件是: 浸出液的液固质量分数比为16:1, 硫酸铵浓度为4.0 mol/L, pH值为5.5, 浸出温度为90℃, 浸出时间为4h。在该条件下, 锌的浸出率达85.16%<sup>[34]</sup>。

## 3 结论与建议

综上所述, 酸浸体系和碱浸体系处理低品位氧化锌矿都存在的问题:

1) 常规的酸浸工艺具有锌浸出率低、酸耗大、浸出液锌浓度低、浸出液难以净化等缺点, 难于在工业生产中应用。

2) 采用氧压酸浸工艺处理高硅氧化锌矿, 可有效避免矿物中可溶性硅的大量溶出, 极大地改善了浸出矿浆的过滤性能。但是该工艺对设备的要求较高, 且对设备的腐蚀性较大, 操作较困难, 不适合大规模工业生产上应用。

3) 采用NaOH浸出-净化-电积生产电锌的工艺处理含高碱性脉石的中低品位氧化锌, 由于铅进入溶液中, 且难于净化脱除, 因而不具备工业应用前景。

4) 在氨-氯化铵介质中, 采用搅拌浸出-净化-电积工艺处理低品位氧化锌矿具有很多优点: 在氨浸出体系中, 利用锌与 $\text{Cl}^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 的配位反应, 能提高锌的溶出速度, 溶液中的锌配位离子能稳定; 钙、砷和硅等杂质元素在该体系中基本不溶解, 有利于浸出液净化除杂; 该浸出体系在堆浸过程中不会板结于矿堆表面, 浸出液可均匀有效地穿透整个矿堆, 避免浸出液短路和死区; 该体系在电积过程中对 $\text{F}^-$ 和 $\text{Cl}^-$ 含

量没有要求,可以省略常规酸浸-电积工艺中的 $F^-$ 和 $Cl^-$ 脱除工艺,而且含锌物料带来的氯可有效补偿流程中氯的损失;净化、除铁负担轻,过程简单,设备要求不高,投资较少。但也存在一定的不足,如由于有 $Cl^-$ 存在,电解过程的阳极反应以析氯为主,氯耗大,设备防腐要求较高;同时,为了保证所生产电解锌的产品质量、提高 $Zn$ 浸出率和浸出液中 $Zn^{2+}$ 的浓度,浸出时必须采用较高的游离氨浓度,导致电积 $Zn$ 时氨挥发严重,因而操作环境恶化,提高了电锌成本。

针对低品位锌矿处理工艺的研究现状,氨法浸出工艺基础研究比较深入,具备了中试规模生产的条件,如果在现有基础上进一步减少 $Cl^-$ 的量,解决氨的循环,将会使低品位锌矿的湿法冶金方法取得更大突破,对低品位矿的开发利用,提高回收率,降低能耗具有十分重要的意义。

#### 参考文献:

- [1] 蒋继穆,王忠实.中国冶锌现状[J].有色冶炼,1996(6): 1-5.  
Jiang Jimo, Wang Zhongshi. Development of Zinc Metallurgy in China[J]. Nonferrous Metallurgy, 1996(6): 1-5.
- [2] 杨声海.  $Zn(II)-NH_3-NH_4Cl-H_2O$ 体系制备高纯锌理论及应用[D].长沙:中南大学冶金科学与工程学院,2003.  
Yang Shenghai. Fundamental and Application of Preparation of High-Purity Zinc in the System of  $NH_4Cl-NH_3-H_2O$ [D]. Changsha: School of Metallurgical Science and Engineering, Central South University, 2003.
- [3] 蓝卓越,胡岳华,黎维中.低品位氧化锌矿硫酸浸出工艺研究[J].矿冶工程,2002,22(3): 63-65.  
Lan Zhuoyue, Hu Yuehua, Li Weizhong. A Study of Sulfuric Acid Leaching of Low-Grade Zinc Oxide Ore[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002, 22(3): 63-65.
- [4] Abdel-Aal EA. Kinetic of Sulfuric Acid Leaching of Low-Grade Zinc Silicate Ore[J]. Hydrometallurgy, 2000, 55: 247-254.
- [5] Youeai Zhao, Robert Standforth. Production of Zn Powder by Alkaline Treatment of Smithsonite Zn-Pb Ores[J]. Hydrometallurgy, 2000, 56: 237-249.
- [6] Kuyucak N. Microorganisms, Biotechnology and Acid Rock Drainage Emphasis on Passive-Biological Control and Treatment Methods[J]. Minerals & Metallurgical Processing, 2000(17): 85-95.
- [7] 林柞彦,华一新.高硅氧化锌矿硫酸浸出的工艺及机理研究[J].有色金属:冶炼部分,2003(5): 9-11, 23.  
Lin Zuoyan, Hua Yixin. Technology and Mechanism Study on Leaching High Silicon Zinc Oxide Ore with Sulfuric Acid [J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2003(5): 9-11, 23.
- [8] 陈永海,覃文庆,黄红军.高硅氧化锌矿酸浸脱硅过程研究进展[J].湖南有色金属,2005,21(1): 14-16, 49.  
Chen Yonghai, Qin Wenqing, Huang Hongjun. Development of Silica-Removal Study on Leaching High-Grade Silico Zinc Oxide Ore with Sulfuric Acid[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2005, 21(1): 14-16, 49.
- [9] Qin Wenqing, Lan Zhuoyue, Li Weizhong. Recovery of Zinc from Low-Grade Zinc Oxide Ores by Solvent Extraction[J]. Journal of Central South University of Technology: English Edition, 2003, 10(2): 98-102.
- [10] Zhuravlev L T. The Surface Chemistry of Amorphous Silica Zhuravlev Model[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering As Pect, 2000, 173: 2-3.
- [11] 谢美求,陈志飞,冯剑,等.氧化锌矿湿法浸出提锌工艺研究[J].矿冶工程,2004,24(1): 67-69.  
Xie Meiqiu, Chen Zhifei, Feng Jian, et al. Hydrometallurgical Extraction of Zinc from Zinc Oxide Ore—A Study[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2004, 24(1): 67-69.
- [12] 徐红江,张延安.低品位氧化锌矿冶金进展[J].有色矿冶,2009,25(2): 28-30.  
Xu Hongjiang, Zhan Ting'an. Progress in Metallurgy of Low-Grade Zinc Oxide Ores[J]. Nonferrous Mining and Metallurgy, 2009, 25(2): 28-30.
- [13] Hua Y, Lin Z, Yan Z. Application of Microwave Irradiation to Quick Leaching of Zinc Silicate Ore[J]. Minerals Engineering, 2002(15): 451-456.
- [14] 李存兄,魏昶,樊刚,等.高硅低品位氧化锌矿氧压酸浸研究[J].矿冶,2009,18(2): 45-49.  
Li Cunxiong, Wei Chang, Fan Gan, et al. Pressure Acid Leaching of High Silicon Low Grade Zinc Oxide Ore[J]. Mining and Metallurgy, 2009, 18(2): 45-49.
- [15] 刘红卫,蔡江松,王红军,等.低品位氧化锌矿湿法冶金新工艺研究[J].有色金属:冶炼部分,2005(5): 29-31.  
Liu Hongwei, Cai Jiansong, Wang Hongjun, et al. Study on Hydrometallurgy Process of Low-Grade Zinc Oxide Ores [J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2005 (5): 29-31.
- [16] 张显生,石明中,许永红,等.高硅天然氧化锌矿浸出新工艺的研究[J].有色金属:冶炼部分,2003(2): 14-25.  
Zhang Xiansheng, Shi Mingzhong, Xu Yonghong, et al. New Leaching Technology Study on High Silicon Content Zinc Oxide Ore[J]. Nonferrous Metals: Extractive Metallurgy, 2003(2): 14-25.
- [17] 李国民.高硅氧化锌矿浸出脱硅工艺的研究[J].中国有色冶金,2005(4): 32-35.  
Li Guomin. Research on Leaching-Desilication Process of Zinc Oxide Ore with High Silicon[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2005(4): 32-35.
- [18] 杨大锦,谢刚,贾云芝,等.低品位氧化锌矿堆浸实验研究[J].过程工程学报,2006,6(1): 59-62.  
Yang Dajin, Xie Gang, Jia Yunzhi, et al. Study on Heap

- Leaching of Low-Grade Zinc Oxide Ore[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(1): 59-62.
- [19] 唐双华, 覃文庆, 何名飞, 等. 氧化锌矿硫化-胺法浮选及浸出研究[J]. 湖南有色金属, 2007(6): 5-7.  
Tang Shuanghua, Qin Wenqing, He Mingfei, et al. Flotation Separation and Sulfuric Acid Leaching of Zinc Oxide Ore[J]. Hunan Nonferrous Metals, 2007(6): 5-7.
- [20] 姚耀春, 王平. 难选氧化锌矿氨浸的动力学研究[J]. 有色金属, 2001, 30(3): 22-24.  
Yao Yaochun, Wang Ping. Kinetics on Ammonia Leaching of Refractory Zinc Oxide Minerals[J]. Nonferrous Metals, 2001, 30(3): 22-24.
- [21] 刘三军, 欧乐明, 冯其明, 等. 低品位氧化锌矿石的碱法浸出[J]. 湿法冶金, 2005, 24(1): 23-25.  
Liu Sanjun, Ou Leming, Feng Qiming, et al. Alkaline Leaching of Zn from Zinc Oxide Ore[J]. Hydrometallurgy of China, 2005, 24(1): 23-25.
- [22] 张元福, 梁杰, 李谦. 铵盐法处理氧化锌矿的研究[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2002, 3(1): 37-42.  
Zhang Yuanfu, Liang Jie, Li Qian. A Study on Treating Zincite by Ammonium Salt Process[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 3(1): 37-42.
- [23] 朱云, 胡汉, 苏云生, 等. 难选氧化锌矿氨浸动力学[J]. 过程工程学报, 2002, 2(1): 82-85.  
Zhu Yun, Hu Han, Su Yunsheng, et al. Kinetics of Leaching Poorly-Floated Zinc-Oxide-Ore with Ammonia[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2002, 2(1): 82-85.
- [24] 李志华, 薛怀生, 姚耀春. 兰坪难选氧化锌矿氨浸动力学[J]. 云南冶金, 2003, 32(4): 22-24.  
Li Zhihua, Xue Huaisheng, Yao Yaochun. Study on Kinetics of Ammonia Leaching of Refractory Zinc Oxide Ore in Lanping [J]. Yunnan Metallurgy, 2003, 32(4): 22-24.
- [25] 张保平, 唐漠堂, 杨声海. 氨法处理氧化锌矿制取电锌[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2003, 34(6): 619-623.  
Zhang Baoping, Tang Motang, Yang Shenghai. Treating Zinc Oxide Ores Using Ammonia-Ammonium Chloride to Produce Electrolysis Zinc[J]. J. Cent. South Univ. Technol.: Natural Science, 2003, 34(6): 619-623.
- [26] Chen Ailiang, Zhao Zhongwei, Jia Xijun. Alkaline Leaching Zn and Its Concomitant Metals from Refractory Hemimorphite Zinc Oxide Ore[J]. Hydrometallurgy, 2009, 97: 228-232.
- [27] Wang Ruixiang, Tang Motang, Yang Shenghai, et al. Leaching Kinetics of Low Grade Zinc Oxide Ore in  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$  System[J]. J. Cent. South Univ. Technol.: English Edition, 2008, 15(5): 679-683.
- [28] 王瑞祥, 唐漠堂, 巨少华, 等.  $\text{Ni(II)-NH}_3\text{-Cl-H}_2\text{O}$  体系中  $\text{Ni(II)}$  配合平衡热力学[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2008, 39(5): 891-896.  
Wang Ruixiang, Tang Motang, Ju Shaohua, et al. Thermodynamics of  $\text{Ni(II)}$  Complex Equilibrium in System of  $\text{Ni(II)-NH}_3\text{-Cl-H}_2\text{O}$ [J]. J. Cent. South Univ. Technol.: Natural Science, 2008, 39(5): 891-896.
- [29] 王瑞祥, 唐漠堂, 刘维, 等.  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$  体系浸出低品位氧化锌矿制取电锌[J]. 过程工程学报, 2008, 8(增刊): 219-222.  
Wang Ruixiang, Tang Motang, Liu Wei, et al. Leaching of Low Grade Zinc Oxide Ore in  $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$  System for Preparation of Electrolytic Zinc[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(S1): 219-222.
- [30] 刘亚川, 刘述平, 李博, 等. 低品位氧化锌矿的氨-铵盐浸出研究[J]. 矿产综合利用, 2008(4): 3-5.  
Liu Yachuan, Liu Shuping, Li Bo, et al. Research on Ammonia-Ammonium Chloride Leaching of a Low-Grade Zinc Oxide Ore[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2008(4): 3-5.
- [31] 杨声海, 李英念, 巨少华, 等. 用  $\text{NH}_4\text{Cl}$  溶液浸出氧化锌矿石[J]. 湿法冶金, 2006, 25(4): 180-182.  
Yang Shenghai, Li Yingnian, Ju Shaohua, et al. Leaching of Zinc Oxide Ore in  $\text{NH}_4\text{Cl}$  Solution[J]. Hydrometallurgy of China, 2006, 25(4): 180-182.
- [32] 刘晓丹, 张元福. 铵盐浸出氧化锌矿动力学的研究[J]. 贵州工业大学学报: 自然科学版, 2004, 33(2): 82-89.  
Liu Xiaodan, Zhang Yuanfu. Kinetics on Treating Zincite by Ammonium Salt Process[J]. Journal of Guizhou University of Technology: Natural Science Edition, 2004, 33(2): 82-89.
- [33] 谢颂明. 氨浸法制取活性氧化锌[J]. 无机盐工业, 1995, 26(4): 8-10.  
Xie Songming. Preparation of Active Zinc Oxide by Ammonia Immersion[J]. Inorganic Chemicals Industry, 1995, 26(4): 8-10.
- [34] 唐漠堂, 张鹏, 何静, 等.  $\text{Zn(II)-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  体系浸出锌烟尘[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2007, 10(5): 867-872.  
Tang Motang, Zhang Peng, He Jing, et al. Leaching Zinc Dust in System of  $\text{Zn(II)-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ [J]. J. Cent. South Univ. Technol.: Natural Science, 2007, 10(5): 867-872.
- [35] 慕思国, 彭长宏, 黄虹, 等. 298 K 时三元体系  $\text{MeSO}_4\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  的相平衡[J]. 过程工程学报, 2006, 6(1): 32-36.  
Mu Siguo, Peng Changhong, Huang Hong, et al. Equilibrium Solubility in Ternary System of  $\text{MeSO}_4\text{-(NH}_4)_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$  at 298 K[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2006, 6(1): 32-36.
- [36] 赵廷凯, 唐漠堂, 梁晶. 制取活性锌粉的  $\text{Zn(II)-NH}_3\text{-H}_2\text{O-(NH}_4)_2\text{SO}_4$  体系电解法[J]. 中国有色金属学报, 2003, 13(3): 774-777.  
Zhao Tingkai, Tang Motang, Liang Jing, et al. Preparation of Active Zinc Powder by Electrowinning in System of  $\text{Zn(II)-NH}_3\text{-H}_2\text{O-(NH}_4)_2\text{SO}_4$ [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2003, 13(3): 774-777.

(责任编辑: 廖友媛)