

doi: 10.3969/j.issn.1005-7854.2020.04.014

## 锌冶炼工艺现状及有价金属高效回收利用新工艺

何 耀

(广西冶金研究院有限公司, 南宁 530023)

**摘 要:** 简述了我国锌冶炼主要工艺技术特点, 我国从锌精矿提取锌及其伴生有价金属回收利用的现状。针对现有冶炼工艺存在有价元素镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝、铜、银、金、铅、锌等随铁渣走, 以及低含量有价元素不能富集回收利用, 致使经济效益损失巨大, 并存在环境污染风险的难题, 为了减少资源浪费, 保护环境, 采用“高温高酸浸出—稀散金属循环累积富集—一渣两液三路分离回收有价金属”的新工艺冶炼锌并综合回收稀贵金属, 取得了锌总回收率超过 97%, 高温高酸浸出渣中铅、银、金回收率在 98% 以上, 稀散金属富液中镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝等回收率为 70%~90%, 可实现有价金属的资源化、高值化和无害化, 且社会、经济、环保效益显著, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 锌冶炼; 稀贵金属; 高温高酸浸出; 循环累积富集; 综合回收

**中图分类号:** TF813      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-7854(2020)04-0073-07

## Current status of zinc smelting process and new technology for high-efficient recovery and utilization of valuable metals

HE Yao

(Guangxi Metallurgical Research Institute Co. Ltd., Nanning 530023, China)

**Abstract:** The main technological features of zinc smelting and the present situation of zinc extraction from zinc concentrate and recovery of associated valuable metals in China are briefly described. In view of the existence of valuable elements such as gallium, indium, thallium, germanium, tin, antimony, bismuth, aluminum, copper, silver, gold, lead and zinc in the existing smelting process, and the fact that the low content valuable elements cannot be enriched and recycled, the loss of economic benefits is huge, and there is the problem of environmental pollution risk. In order to reduce the waste of resources and protect the environment, a new process of high temperature and high acid leaching, cyclic accumulation and enrichment of scattered metals, One slag—Two Liquids—Three separate ways for recovering valuable metals is employed for zinc smelting and comprehensive recovery of rare and precious metals. The total recovery of zinc is more than 97%, the recovery of lead, silver and gold in high temperature and high acid leaching residue is more than 98%, and the recovery of gallium, indium, thallium, germanium, tin, antimony, bismuth and aluminum from rich solution of scattered metals is 70%—90%, which can realize the resource utilization, high value and harmlessness of valuable metals, and has remarkable social, economic and environmental protection benefits and good application prospect.

**Key words:** zinc smelting; rare and precious metals; high temperature and high acid leaching; cyclic accumulation and enrichment; integrated recovery

收稿日期: 2019-11-12

作者简介: 何耀, 高级工程师, 主要从事冶金技术与工程设计。E-mail: heyao.88@163.com

随着社会经济的发展, 有色金属、贵金属、稀散金属的需求量不断增加。2018 年, 我国锌产量达 568.1 万 t, 约占世界总产量的 40%, 年需消耗锌精矿约 1 070 万 t。锌精矿伴生有贵金属、稀散

金属和其他有色金属,若其平均含量按铜 0.4%、镉 0.3%、钴 0.003%、镍 0.002%、镓 0.009%、铟 0.03%、铊 0.002%、锗 0.009%、锡 0.05%、铅 0.9%、铋 0.06%、铟 0.01%、银 80 g/t、金 0.1 g/t 进行估算,我国每年消耗锌精矿中伴生金属的资源量为:铜 42 800 t、镉 32 100 t、钴 321 t、镍 214 t、镓 963 t、铟 3 210 t、铊 214 t、锗 963 t、锡 5 350 t、铅 96 300 t、铋 6 420 t、铟 1 070 t、银 856 t、金 1.07 t。可见,锌精矿是一个巨大的贵金属、稀散金属和其他有色金属的资源宝库,伴生有价金属总资源量巨大,总价值达 200 亿元以上。传统冶炼工艺中,有价元素镓、铟、铊、锗、锡、铋、铟、铝、铜、银、金、铅、锌等随铁渣走,损失较大,而且低含量的有价元素不能富集回收利用,急需开发新的锌冶炼工艺,在提高主金属锌的回收率的同时,做好伴生有价金属综合回收,这不但是企业提高经济效益、增强国内外竞争力的需要,也是减少重金属污染物排放、保护环境的需要。

## 1 锌冶炼工艺技术应用现状

### 1.1 火法炼锌

火法炼锌方法有平罐炼锌、竖罐炼锌、电炉炼锌和密闭鼓风炉炼锌<sup>[1-3]</sup>。其中,平罐炼锌和竖罐炼锌均已被淘汰。电炉炼锌工艺的产品为粗锌,锌回收率低、综合回收能力差,只有在边远地区、当地水电丰富的少数几家中、小型企业采用。密闭鼓风炉炼锌适合于铅锌混合矿的处理,韶关冶炼厂和葫芦岛有色金属集团公司等曾使用该法生产,该工艺能同时回收铅锌,具有一定竞争力,但生产时污染严重。

与湿法炼锌相比,火法炼锌普遍存在烟气和粉尘污染、劳动条件差、能耗高、停产检修、开炉费用大、有价金属综合利用率较低的问题。我国目前火法炼锌产量只占约 10%。

### 1.2 湿法炼锌

湿法炼锌产量约占锌总产量的 90%,冶炼工艺有传统的两段浸出法,以高温高酸浸出为代表的黄钾铁矾法、针铁矿法、赤铁矿法、喷淋除铁法。全湿法炼锌有加压富氧直接浸出法、常压富氧直接浸出法等<sup>[4-9]</sup>。前 5 种锌冶炼工艺流程为“焙烧—浸出—净化—电解—熔铸”,实质上是火法和湿法联合流程,所用原料要经过焙烧脱硫,含 SO<sub>2</sub> 的烟

气用来生产硫酸,烟气余热产高压蒸汽,用来发电和加热溶液。某企业近年来制酸尾气加装脱硫装置后,其 SO<sub>2</sub> 排放量减少约 60%,环保成果显著。全湿法炼锌工艺流程为“浸出—净化—电解—熔铸”,其 SO<sub>2</sub> 排放量为零。

与火法炼锌相比,湿法炼锌具有生产环境好、资源利用率高、能耗低、生产易于控制等优点,是我国目前主要的炼锌工艺。

#### 1.2.1 常规浸出法

常规浸出法分为两段中性浸出和一中一酸(一段中性浸出加一段酸性浸出)浸出,是我国湿法炼锌的主要生产方法,其产量占湿法炼锌总产量约 60%<sup>[10-11]</sup>。应用该法的代表性企业有株冶集团、河南豫光锌业、云南驰宏锌锗股份有限公司。常规浸出法因浸出时使用的硫酸浓度低,锌原料浸出率只有 86%左右,产出的浸出渣含锌在 20%左右,浸出渣一般先进行银浮选,产出银精矿外售。但当锌原料含银低时,银浮选系统不能产生效益。浸出渣送还原挥发窑生产含锌 50%以上的次氧化锌,浸出渣中的锌、铅、镉、铟、锗、铊等只有 70%~92%,银、锡、铋、铟、镓等只有 30%~70%进入次氧化锌,浸出渣中的铜、金不挥发,几乎全部进入挥发窑渣中。可见,用挥发窑处理常规浸出法产出的浸出渣时,进入窑渣中不能回收而损失的铜、铅、锌、镓、铟、铊、锗、锡、铋、银、金等数量仍相当可观,且用挥发窑处理浸出渣能耗高,含低浓度 SO<sub>2</sub> 的烟气排放量大。

#### 1.2.2 热酸浸出黄钾铁矾法

热酸浸出黄钾铁矾法产锌量约占湿法炼锌总产量的 25%,西北铅锌冶炼厂、广西华锡集团来宾冶炼厂等应用该法生产<sup>[12-13]</sup>。与常规浸出法相比,该法增加了高温高酸浸出,投入钠盐、铵盐使三价铁生成铁矾沉淀。由于采用高温高酸浸出,原料中的铁酸锌和金属硫化物得到溶解,锌浸出率高,达到 98%左右,有价金属铜、镓、铟、铊、锗、锡、铋、铟的浸出率为 80%~95%。高温高酸浸出后所得浸出渣(以下简称“高浸渣”)渣率只有 15%~20%,且 98%~99.5%以上的金、银、铅以不溶物形式进入高浸渣中,富集了 5~7 倍,可作为炼铅原料,同时回收金、银,缺点是铁矾渣含铁低,只有 20%左右,沉铁矾时,溶液中的镓、铟、铊、锗、锡、铋一起沉淀,如国内某厂从富铟铁矾渣中回收铟,回收率不足 60%。由于从铁矾中回收有价金属难度大、成本高,国内大部分企业采取

堆存处理，但因铁矾渣量大、堆存占地面积大，堆存时铁矾渣中的可溶重金属会污染环境。从目前来看，该法除了铅、银、金有较高回收利用率之外，锌、镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋的损失要比常规浸出法大，并且堆存的铁矾渣存在较大的环境污染风险。有的厂家已开展通过技改回归到常规浸出法加挥发窑处理工艺。

### 1.2.3 热酸浸出针铁矿法

热酸浸出针铁矿法也使用高温高酸浸出，锌的浸出率可超过 97%<sup>[14-15]</sup>。湖南水口山四厂应用该法。该法除铁过程为：先用锌精矿作还原剂把溶液中的  $\text{Fe}^{3+}$  还原成  $\text{Fe}^{2+}$ ，使铁进入溶液，然后用氧气作氧化剂再将溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ， $\text{Fe}^{3+}$  在溶液中发生水解生成结晶态的针铁矿沉淀。溶液中的镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝、砷等随铁渣沉淀而开路。针铁矿法沉铁比黄钾铁矾法产渣率小，渣含铁为 40% 左右，但由于针铁矿结晶是一个聚合物，其吸附能力强，并且在水解过程中为了维持溶液 pH 值大于 3，必须加入含锌原料作中和剂，导致渣含锌超过 8%，此渣属于危险废物，必须建挥发窑回收处理。因此，进入窑渣中不能回收而损失的有价金属量大。该法流程较为复杂、能耗较高，基建及运营费用也较高，阻碍了其应用。

### 1.2.4 热酸浸出一喷淋除铁法

热酸浸出一喷淋除铁法由江苏冶金研究所与温州冶炼总厂共同开发<sup>[16-17]</sup>，也使用高温高酸浸出，因此锌的浸出率也可超过 97%。其除铁过程为：先用氧化剂把溶液中的  $\text{Fe}^{2+}$  氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ，在溶液 pH 值大于 3 的条件下，控制  $\text{Fe}^{3+}$  的氧化速度小于  $\text{Fe}^{3+}$  的水解速度， $\text{Fe}^{3+}$  生成结晶态的针铁矿沉淀。溶液中的镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝、砷等随铁渣沉淀而开路，但铁渣含锌较高，同样需用挥发窑处理，因此有价金属的回收利用率低。

### 1.2.5 热酸浸出赤铁矿法

日本饭岛冶炼厂自 1972 年以来一直采用该法生产。我国云锡文山锌铟冶炼有限公司采用热酸浸出赤铁矿法炼锌，并在 2018 年建成投产了 10 万 t 锌/年生产线<sup>[18-20]</sup>。该法也使用高温高酸浸出，因此锌的浸出率也超过 97%。其除铁在高温高压条件下进行，使铁以赤铁矿 ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) 析出，渣率最小，可得到高铁低锌渣 (含 Fe 58%~60%，含 Zn

约 0.5%)，此渣不需建挥发窑处理，可作为炼铁原料或生产铁红涂料使用。由于在沉淀分离铟之前先把铁还原为二价铁，铟渣含铁低、富集度高，对有价金属回收利用有利，但该法目前不具备对稀散金属循环累积富集能力，不利于对低含量的镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋等有价金属的回收利用。

### 1.2.6 加压富氧直接浸出法

云南冶金集团和丹霞冶炼厂应用该法生产。该法让浸出在高温高压和富氧的环境中进行，具有工艺流程简洁、不产生  $\text{SO}_2$  污染环境，硫以元素硫形式产出，不受硫酸市场制约。加压富氧浸出反应速度快，并有较高的浸出回收率，溶液除铁采用针铁矿法，缺点是操作控制难度高，需要从浸出渣中分离回收元素硫，尾渣才能进入炼铅系统回收，铁渣同样需用挥发窑处理，不具备对稀散金属循环累积富集能力，有价金属回收利用率还有待进一步提高<sup>[21-24]</sup>。

### 1.2.7 常压富氧直接浸出法

2009 年株洲冶炼厂引进并建成了年产 13 万 t 锌的常压富氧浸出生产线。该法避免了加压富氧浸出高压釜设备制造要求高、操作控制难度大等问题，同样可达到浸出锌回收率高的目的，溶液除铁采用针铁矿法。常压富氧浸出法的投资比加压浸出法相对要低，操作控制简单，维修费用稍低，但相对于加压浸出，其反应时间较长，浸出反应器设备庞大，底部搅拌对密封要求较高，运行费用也较高。由于浸出渣中硫与银、锌、镉高度混合，分离困难，浮选时 50% 以上进入硫精矿中造成损失<sup>[25-27]</sup>，不具备对稀散金属循环累积富集能力，铁渣同样需用挥发窑处理，对有价金属的回收利用效果并不好。

## 2 高温高酸浸出—稀散金属循环累积富集回收有价金属新工艺

为了解决目前锌冶炼过程中的锌及其伴生有价金属损失大、低含量有价元素不能富集回收利用、金属回收利用率过低、经济效益损失巨大和环境污染风险大等问题，本文作者提出采用高温高酸浸出—稀散金属循环累积富集—渣两液三路分离回收有价金属工艺，工艺流程见图 1。



金属富液和低酸浸出渣，低酸浸出渣送到高温高酸浸出回收。因为在高温高酸浸出时，溶液中的 $\text{Fe}^{3+}$ 能促进金属硫化物溶解，同时 $\text{Fe}^{3+}$ 被还原成为 $\text{Fe}^{2+}$ ，所以一般只在产出稀散金属富渣前才另外投入还原剂把过多的 $\text{Fe}^{3+}$ 还原成为 $\text{Fe}^{2+}$ ，让铁从中性浸出液开路。

### 3) 一渣两液三路分离回收有价金属

所谓一渣，即整个浸出系统产出的渣，只有一条高浸渣开路。锌原料中98%以上铅、银、金以不溶物形式进入高浸渣中，高浸渣渣率为15%~20%，铅、银、金富集5~7倍。另外有1%~10%的锌、镉、铜、钴、镍、镓、铟，5%~30%的锡、锑、铋、铊、锗、铁、砷、铝未被浸出(或是浸出后生成新的不溶盐)进入高浸渣中，高浸渣作为炼铅原料，在炼铅过程中回收铅、银、金，并富集高浸渣中的其它有价金属。

所谓两液，即整个浸出系统有两条溶液开路：一是中性浸出液，二是稀散金属富液。

中性浸出液中含有投入原料中93%~99%的锌、镉、铜、钴、镍，约70%的铁和约5%的砷。镉、铜、钴在置换时进入置换渣中，从置换渣中回收利用，铁用赤铁矿法除去，得到含锌低、铁高的赤铁矿，作为炼铁原料或生产铁红涂料使用。

稀散金属富液中含有投入原料中60%~90%的镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝和砷。通过加碱调节溶液的pH值，分步沉淀分别得到锡、锑、铋、铊富集物和镓、铟、锗、铝、砷富集物，再经碱浸得铟富集物和富锗、镓、铝、砷溶液。

## 2.2 工艺特点及优化方向

### 2.2.1 工艺特点

1) 适用原料广泛。硫化锌焙烧矿和烟尘，铜、铅、锡、锑等其它有色金属冶炼过程中回收的次氧化锌烟尘，从钢铁厂含锌尘泥中回收的次氧化锌烟尘，锌氧化矿等，这些都可作为主要原料使用。常规浸出法产出的浸出渣和以锌为主并含多种有价元素的冶炼废渣可作搭配原料使用。这为当下锌精矿资源越来越紧张和匮乏的情况下，开辟了新的炼锌原料供应来源。

2) 流程简单、固定投资少，现有的大部分湿法炼锌生产线具备技术改造条件，技术可靠。生产工艺是由工业生产证实成熟可靠的工艺技术经集成创新而成。按本工艺流程做了15~20 kg级试验表明，对含铟0.031%~0.09%的次氧化锌原料，铟的回收利用率为81.6%~87.5%，对次氧化锌原

料中的锡、锑、铋等金属的回收利用率(包括稀散金属富液和高浸渣中回收的金属)分别为94.2%、97.8%和96.2%以上<sup>[29]</sup>。

3) 采用赤铁矿法除铁，得到高铁低锌渣(含Fe 58%~60%，含Zn约0.5%)，不需要建挥发窑处理铁渣，铁渣可作为炼铁原料搭配使用或生产铁红涂料使用，且铁渣中少量的锌金属还可在炼铁时产生的高炉尘泥中富集回收利用，因此本工艺具有极高的锌金属回收利用率，实现了铁渣资源化，锌冶炼厂废渣零排放和无挥发窑烟气排放污染环境，实现锌冶炼清洁生产。以全国年消耗锌精矿约1 070万t计，从高铁低锌渣中可回收铁约90万t，锌约0.8万t。

4) 产品中锌的总回收率超过97%，高浸渣中铅、银、金的回收率超过98%，稀散金属富液中镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝等回收率为70%~90%。彻底解决了有价元素镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝、铜、银、金、铅、锌等随铁渣走造成损失大的难题，彻底解决了有价元素镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋回收利用率低的问题。实现了有价金属资源化、高值化、无害化，社会、经济、环保效益显著，新工艺具有良好的应用前景。

### 2.2.2 工艺优化方向

高温高酸浸出一稀散金属循环累积富集—一渣两液三路分离回收有价金属的锌冶炼工艺为冶炼锌的新工艺，虽然锌回收率高并能高效、综合回收锌精矿中的稀贵等有价金属，但目前尚处于实验阶段，需要进一步的验证和完善，建议从以下几个方面进行优化。

1) 中性浸出完成后的矿浆用压滤机压滤，再进行高温高酸浸出，目的是增加中性浸出液产量，并避免因返液过多而降低高温高酸浸出时的始酸浓度，造成浸出率下降。高浸渣、赤铁矿渣用带有水洗、榨干功能的压滤机压滤，能提高锌回收率和便于高浸渣、赤铁矿渣的堆存和转运利用。

2) 当高浸液含 $\text{Fe}^{3+}$ 过高时( $\geq 4$  g/L)，为了得到易压滤的中性浸出矿浆，可采用如下办法：在高温高酸浸出时投入还原剂，还原高浸液中的 $\text{Fe}^{3+}$ 浓度至4 g/L以下。或是中性浸出时先用回收的低度水与含锌原料打浆，再投入高浸液，控制高浸液流量，使加入的 $\text{Fe}^{3+}$ 速度小于溶液中 $\text{Fe}^{3+}$ 的水解速度，使 $\text{Fe}^{3+}$ 水解生成过滤性能好的针铁矿，避免形成胶体。

3) 采用赤铁矿法除铁，利用沸腾炉产的高压蒸汽加热，用氧气或双氧水做氧化剂，在高温(180~

200 ℃)、氧压(1.0~2.0 MPa)的操作条件下,中性浸出液中的  $Fe^{2+}$  被氧化生成赤铁矿沉淀,得到渣率小、锌回收率高的高铁低锌渣,可作为炼铁原料或生产铁红涂料使用。

4)当原料含氟过高时,在中和时用石灰中和,当原料含氯过高影响电解时,增加除氯工序。

5)用自产的含锌烟尘(或次氧化锌)矿浆吸收制酸尾气中的  $SO_2$ , 减少  $SO_2$  排放量,同时产出的亚硫酸锌矿浆用于把高温高酸浸出液中的  $Fe^{3+}$  还原成为  $Fe^{2+}$ , 亚硫酸锌被氧化生成硫酸锌,让铁从浸出液中开路,提高稀散金属富渣中有价金属含量,也使亚硫酸锌矿浆得到比较合理的利用。

### 3 结论

1)采用传统锌冶炼工艺处理锌精矿,锌精矿中的有价元素镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝、铜、银、金、铅、锌等随铁渣走,且低含量有价元素不能富集回收利用,致使经济效益损失大,并存在环境污染风险。

2)本文提出的高温高酸浸出一稀散金属循环累积富集——渣两液三路分离回收有价金属的锌冶炼新工艺所得锌总回收率高,并可综合回收稀贵金属,实现有价金属的资源化、高值化和无害化,且社会、经济、环保效益显著,具有良好的应用前景,有望成为冶炼锌的新工艺。

3)采用高温高酸浸出一稀散金属循环累积富集——渣两液三路分离回收有价金属的锌冶炼新工艺锌总回收率可超过 97%,高温高酸浸出渣中铅、银、金回收率在 98%以上,稀散金属富液中镓、铟、铊、锗、锡、锑、铋、铝等回收率 70%~90%。

#### 参考文献

[1] 北京有色冶金设计研究总院. 重有色金属冶炼设计手册—铅锌铋卷 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995. Beijing Nonferrous Metallurgical Design and Research Institute. Design manual for heavy non-ferrous metal smelting—Lead—Zinc—Bismuth roll [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995.

[2] 陈德喜, 段力强. 我国电炉炼锌工艺的技术进步与发展 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2003(2): 20-23. CHEN D X, DUAN L Q. Technicai progress and developing on zinc smelting with electrical arc furnace in China [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2003(2): 20-23.

[3] 白桦. 密闭鼓风炉炼铅锌 [J]. 工程设计与研究,

2005, 117(6): 6-9.

BAI H. Lead and zinc smelting in closed blast furnace [J]. Engineering Design and Research, 2005, 117(6): 6-9.

[4] 王成彦, 陈永强. 中国铅锌冶金技术状况及发展趋势: 锌冶金 [J]. 有色金属科学与工程, 2017, 8(1): 1-7. WANG C Y, CHEN Y Q. Lead and zinc metallurgy technology situation and development treads of China: Zinc metallurgy [J]. Nonferrous Metals Science and Engineering, 2017, 8(1): 1-7.

[5] 刘三平, 王海北, 蒋开喜, 等. 中国湿法炼锌的新进展 [J]. 矿冶, 2009, 18(4): 25-31. LIU S P, WANG H B, JIANG K X, et al. New development of zinc hydrometallurgy in China [J]. Mining and Metallurgy, 2009, 18(4): 25-31.

[6] 何醒民. 我国湿法炼锌技术的发展与展望 [J]. 工程设计与研究, 2005, 118(5): 24-27. HE X M. Development and prospect of zinc hydrometallurgy technology in China [J]. Engineering Design and Research, 2005, 118(5): 24-27.

[7] 李若贵. 我国铅锌冶炼工艺现状及发展 [J]. 中国有色冶金, 2010, 39(6): 13-20. LI R G. Status and development of lead and zinc smelting process in China [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010, 39(6): 13-20.

[8] 高保军. 锌冶炼技术现状及发展探讨 [J]. 中国有色冶金, 2008, 37(3): 12-16. GAO B J. Study status quo of zinc smelting technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2008, 37(3): 12-16.

[9] 彭涛. 中国铅锌工业现状及发展趋势 [J]. 中国有色金属, 2013(22): 46-48. PENG T. Current situation and development trend of lead and zinc industry in china [J]. China Nonferrous Metals, 2013(22): 46-48.

[10] 梅光贵. 湿法炼锌学 [M]. 长沙: 中南大学出版社, 2001. MEI G G. Hydrometallurgy of zinc [M]. Changsha: Central South University Press, 2001.

[11] 张恩明. 降低常规法锌冶炼浸出渣含锌实践 [J]. 有色金属工程, 2015, 5(4): 40-43, 48. ZHANG E M. The practice of reducing the amount of zinc in leaching slag by conventional method of zinc smelting [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2015, 5(4): 40-43, 48.

[12] 杨斌. 对湿法炼锌热酸浸出一黄钾铁矾法工艺的探讨 [J]. 甘肃冶金, 2010, 32(3): 56-58.

- YANG B. Discussion on hot acid leach-jarosite process of hydrometallurgy zinc [J]. Gansu Metallurgy, 2010, 32(3): 56-58.
- [13] 王顺才, 张豫. 热酸浸出黄钾铁矾法工艺的生产实践 [J]. 有色冶炼, 2001, 30(2): 19-22, 42.  
WANG S C, ZHANG Y. Production practice of jarosite process in hot-acid leaching [J]. Non-ferrous Smelting, 2001, 30(2): 19-22, 42.
- [14] 邓永贵, 陈启元, 尹周澜, 等. 锌浸出液针铁矿法除铁 [J]. 有色金属, 2010, 62(3): 80-83.  
DENG Y G, CHEN Q Y, YIN Z L, et al. Removal of ferrous/ferric ions from zinc leaching solution by goethite process [J]. Nonferrous Metals, 2010, 62(3): 80-83.
- [15] 孙天友. 针铁矿除铁工艺改进 [J]. 湖南有色金属, 2014(4): 32-35.  
SUN T Y. Improvement of goethite precipitation process [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2014(4): 32-35.
- [16] 杜敏, 吴玉席. 针铁矿法喷淋除铁试验研究 [J]. 中国有色冶金, 2012, 41(3): 78-81.  
DU M, WU Y X. Experimental study on iron removal by goethite method [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2012, 41(3): 78-81.
- [17] 王运健. 喷淋沉淀除铁工艺的应用 [J]. 有色冶炼, 1999, 28(4): 9-12.  
WANG Y J. Application of spraying precipitator in iron removal [J]. Non-ferrous Smelting, 1999, 28(4): 9-12.
- [18] 邓志敢, 魏昶, 张帆, 等. 湿法炼锌赤铁矿法除铁及资源综合利用新技术 [J]. 有色金属工程, 2016, 6(5): 38-43.  
DENG Z G, WEI C, ZHANG F, et al. Resource utilization and hematite precipitation in zinc hydrometallurgy [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2016, 6(5): 38-43.
- [19] 张成松, 赵婷. 赤铁矿除铁法在湿法炼锌工艺中的应用 [J]. 湖南有色金属, 2014, 30(2): 39-41.  
ZHANG C S, ZHAO T. Application of the hematite process for removing iron in the zinc hydrometallurgical production [J]. Hunan Nonferrous Metals, 2014, 30(2): 39-41.
- [20] 王树楷. 铜冶金 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.  
WANG S J. Indium metallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
- [21] 陈锋. 氧压浸出炼锌工艺技术概论 [J]. 中国有色冶金, 2015, 44(6): 21-24.
- CHEN F. An outline of china oxygen pressure leaching zinc technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015, 44(6): 21-24.
- [22] 胡东风, 刘新元. 锌精矿氧压浸出生产实践分析 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3): 19-21.  
HU D F, LIU X Y. Analysis on production practice of oxygen pressure leaching of zinc concentrate [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(3): 19-21.
- [23] 全一喆. 锌氧压浸出工艺的应用及推广 [J]. 矿冶, 2011, 20(4): 94-97.  
TONG Y Z. Application and popularization of zinc pressure leach process [J]. Mining and Metallurgy, 2011, 20(4): 94-97.
- [24] 李有刚, 李波. 锌氧压浸出工艺现状及技术进展 [J]. 中国有色冶金, 2010, 39(3): 26-29.  
LI Y G, LI B. Status and development progress of zinc pressure leaching process [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2010, 39(3): 26-29.
- [25] 李若贵. 常压富氧直接浸出炼锌 [J]. 中国有色冶金, 2009, 38(3): 12-15.  
LI R G. Atmospheric oxygen-rich direct leaching of zinc concentrate [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2009, 38(3): 12-15.
- [26] 董巧龙. 锌精矿常压浸出与加压浸出工艺比较 [J]. 中国有色冶金, 2007, 36(4): 24-26.  
DONG Q L. Comparison between zinc concentrate normal pressure leaching and high pressure leaching [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2007, 36(4): 24-26.
- [27] 张艳华, 唐广群. 常压富氧浸出工艺中浮选回收元素硫的研究与应用 [J]. 中国有色冶金, 2011, 40(3): 51-53.  
ZHANG Y H, TANG G Q. Study on recovery of elemental sulfur by flotation in atmospheric enriched-oxygen leaching zinc process and its application [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2011, 40(3): 51-53.
- [28] 郭天立, 未立清, 林伟, 等. 锌焙砂常规浸出条件下  $\text{Cu}^{2+}$  行为分析 [J]. 中国有色冶金, 2013, 42(3): 61-63.  
GUO T L, WEI L Q, LIN W, et al. Analysis of  $\text{Cu}^{2+}$  behavior of zinc calcine under conventional leaching conditions [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2013, 42(3): 61-63.
- [29] 何耀. 一种次氧化锌原料高效资源化利用方法: CN109897966A [P]. 2019-06-18.  
HE Y. Efficient recycling method of crude zinc oxide raw material: CN109897966A [P]. 2019-06-18.