

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2024.05.003

# 锌精矿氧压浸出技术研究进展

刘鑫宇, 郭宝, 左蔚然

(福州大学紫金地质与矿业学院, 福州 350108)

**摘要:**传统湿法炼锌工艺存在烟气处理成本高、综合回收率低等问题,近年来,氧压浸出技术因其原料适应性强、锌回收率高、环境污染小等优点被应用于锌冶炼工业。介绍了锌精矿氧压浸出的生产工艺,论述了浸出过程反应的基本原理,以及离子催化、温度、酸度、分散剂等条件对浸出过程离子行为的影响与机理。讨论了锌精矿中伴生元素铁、镓、锗、铟、银等的浸出行为及在不同浸出条件下浸出行为的变化。

**关键词:**湿法炼锌; 锌精矿; 氧压浸出; 硫酸浸出

**中图分类号:** TF813

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1007-7545(2024)05-0019-08

## Research Progress of Oxygen Pressure Leaching Technology of Zinc Concentrate

LIU Xinyu, GUO Bao, ZUO Weiran

(School of Zijin Geology and Mining, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The traditional zinc hydrometallurgy process has problems such as high flue gas treatment cost and low comprehensive recovery rate. In recent years, oxygen pressure leaching technology has been applied to the zinc smelting industry due to its advantages of strong adaptability to raw materials, high zinc recovery rate, and low environmental pollution. The production process of zinc concentrate oxygen pressure leaching was introduced. The basic principle of the leaching process reaction was discussed, and the influence and mechanism of ion catalysis, temperature, acidity, dispersants and other conditions on ion behavior during the leaching process were analyzed. The leaching behavior of accompanying elements such as Fe, Ga, Ge, In, and Ag in zinc concentrate and their changes under different leaching conditions were discussed.

**Key words:** zinc hydrometallurgy process; zinc concentrate; oxygen pressure leaching; sulfuric acid leaching

锌是一种重要的有色金属资源,因其熔点低、抗腐蚀性能好而广泛应用于机械、材料、电池、医疗等领域,是国民经济和工业发展的重要资源<sup>[1-4]</sup>。闪锌矿是自然界中最主要的含锌矿物,也是提炼金属锌最主要的原料。闪锌矿中的锌以硫化锌(ZnS)形式存在,多与其他金属硫化物伴生;最常见的是与方铅矿(PbS)紧密共生,形成铅锌矿床<sup>[5-7]</sup>。闪锌矿原矿品位通常为10%~20%,通过浮选选别获得品位为

50%左右的锌精矿<sup>[8]</sup>再进行冶金处理。

火法炼锌是传统的锌冶炼工艺,硫化锌精矿经过焙烧发生氧化反应,得到氧化锌焙砂,再使用碳作为还原剂从焙砂中还原锌,锌以蒸气形式挥发,冷却后得到液态锌<sup>[9]</sup>。传统火法炼锌相对来说工艺成熟,但产品品位较低、综合回收率较低<sup>[10]</sup>。目前全世界85%以上的锌由湿法炼锌工艺生产,主要工艺流程包括焙烧、浸出、净化除杂、电解沉积。锌精矿

收稿日期:2023-11-22

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC2902800)

作者简介:刘鑫宇(1998-),女,硕士研究生;通信作者:左蔚然(1983-),男,博士,教授

首先经过焙烧流程得到锌焙砂,焙砂的主要成分为氧化锌,然后再用稀硫酸作溶剂,并控制温度、酸度、压力等<sup>[11]</sup>浸出条件,使得焙砂中锌以可溶性硫酸锌的形式进入溶液<sup>[12-13]</sup>。但是传统湿法炼锌工艺锌溶出的同时,铁也会大量溶出,造成除铁试剂消耗大<sup>[14]</sup>,而且焙烧流程产生的SO<sub>2</sub>使得烟气处理成本高、环境污染严重。氧压酸浸技术因其锌浸出率高、生产成本低、环境污染小逐渐被应用于锌冶炼工业中。氧压浸出技术省去了焙烧和烟气处理系统,克服了传统冶炼工艺浸出率低、环境污染严重等缺点,硫以元素硫的形式回收,便于储存、运输,并且可处理高硅、高铁等成分复杂的锌矿物<sup>[15]</sup>,同时具有环境友好、回收率高等优点<sup>[16]</sup>,已成为目前国内外研究的热点。

## 1 锌精矿的氧压浸出工艺及反应原理

### 1.1 锌精矿氧压浸出工艺

将锌精矿细磨至一定粒度,使用硫酸溶液调浆至合适液固比、酸度后加入到反应釜中,充入氧气,保持一定温度、压力完成浸出反应。硫化锌精矿中的锌被溶解并以硫酸锌形式进入溶液,大部分的硫被氧化为硫单质进入到渣中,与其余不可溶的物质组成浸出渣<sup>[17]</sup>。随着浸出时间的延长,渣中开始出现硫酸盐。浸出液经净化、电解沉积后得到锌,浸出渣经浮选、热滤等流程产出单质硫<sup>[18]</sup>。

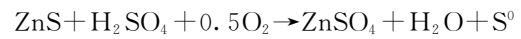
常见氧压浸出工艺有一段浸出和两段浸出,一段浸出酸溶液浓度较高,通常加入锌焙砂作为中和剂,与焙烧法联合使用。两段浸出酸溶液浓度较低,可独立处理硫化锌精矿<sup>[19]</sup>。锌焙砂通常被用于中和氧压浸出过程产生的酸溶液,WANG等<sup>[20]</sup>对氧压浸出过程产生的中和渣进行了试验研究,在合理的工艺参数下将中和渣送入高压釜,与锌精矿一起进行氧压酸浸处理,可获得较好的经济效益。中金岭南丹霞冶炼厂采用“一段低温低压浸出一二段中温中压浸出”工艺加压浸出锌精矿,是典型的两段浸出工艺,该工艺实现了镓、锗、银的综合回收,以及硫的高效回收<sup>[21]</sup>。

工业上浸出过程所用酸溶液一般为电解过程的废电解液。为避免废酸对环境的污染,张爽等<sup>[22]</sup>使用绿矾作为氧压浸出的浸出剂,从氧化锌矿物中选择性浸出锌,考察了绿矾用量、温度、氧分压及反应时间对锌浸出率和铁入渣率的影响,确定了合理的工艺条件,在取得较高锌浸出率的同时实现了脉石元素的同步分离,简化了除杂工艺,也避免了废酸对

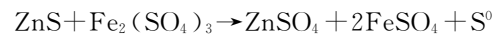
环境的污染。

### 1.2 锌精矿氧压浸出反应原理

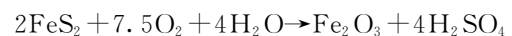
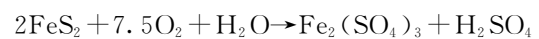
氧压浸出反应过程十分复杂,涉及化学反应过程、反应过程动力学、主要元素的浸出行为、介质体系的影响等方面。反应过程是涉及气体、液体、固体的多相反应,发生在两相或三相界面上<sup>[23]</sup>;在较高的压力下,氧气在液相中充分溶解,并随浸出剂离子扩散并吸附到反应物界面上,发生界面化学反应。随着界面化学反应的进行,有价金属以离子形式解离,形成由反应产物和未反应物组成的包裹层,并且不断向中心扩散,反应速率与反应界面处离子浓度有关<sup>[24]</sup>。硫化锌精矿浸出过程的反应<sup>[25-26]</sup>为:



通常情况下该反应进行得很慢,而溶解的铁是一种有效的氧传递的载体,可以加速ZnS的溶解<sup>[27-28]</sup>,反应原理如下:

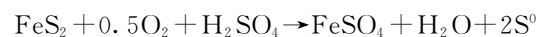


硫化锌与硫酸铁反应生成可溶的硫酸锌及单质硫,在这个过程中Fe<sup>3+</sup>被还原成Fe<sup>2+</sup><sup>[29]</sup>。铁闪锌矿(Zn,FeS)、黄铁矿(FeS<sub>2</sub>)和磁黄铁矿(Fe<sub>7</sub>S<sub>8</sub>)中的铁都可以溶解进入溶剂,传递氧气<sup>[30]</sup>。值得注意的是,不同的浸出条件会影响黄铁矿的氧化程度,在高温、强氧化条件下黄铁矿中的硫会氧化产生硫酸根:



该反应称为硫的酸化,如果硫持续酸化,酸锌离子不断富集,系统中过量的酸会影响浸出效果及后续处理过程<sup>[28]</sup>。为控制氧压浸出过程中硫的酸化,解决氧压浸出过程酸过量的问题,徐静等研究了氧分压、温度、终酸浓度、浸出时间及对锌浸出率和硫酸化率的影响<sup>[29]</sup>。通过控制合理的二段浸出反应条件,控制氧压浸出酸化率的同时确保获得了较高的锌浸出率。

在酸浓度较高、而氧气不充足、温度较低的条件黄铁矿氧化会产生单质硫<sup>[30]</sup>:



在温度较高、而酸浓度较低的条件,三价铁水解会产生铁矾沉淀<sup>[31]</sup>;铁矾包裹大量的锌造成锌难以浸出,同时造成氧压浸出工艺的渣量增加,而且渣中有价金属元素也难以被回收。因此,为了避免浸出过程中铁矾的生成,要严格控制浸出剂的酸度<sup>[32]</sup>。

## 2 浸出条件对浸出反应的影响

### 2.1 离子催化的影响

硫化锌精矿的浸出反应本质上是电化学反应过程,闪锌矿中的晶格缺陷和杂质阳离子对浸出反应的动力学有着显著的影响<sup>[33]</sup>。随着闪锌矿中含铁量的不同,铁闪锌矿相较于纯闪锌矿酸溶反应和氧化溶出反应都更趋于容易进行,也更容易产生单质硫。

一般来说,在足够的氧气和酸度下,精矿中 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 和 $\text{Mn}^{2+}$ 等可以起到传递氧气的作用,还可以参与电化学反应过程,促进有价金属离子的浸出<sup>[34-35]</sup>。在不存在催化离子的情况下,氧化浸出过程是缓慢的。硫化锌先溶解产生 $\text{H}_2\text{S}$ ,然后 $\text{H}_2\text{S}$ 被 $\text{Fe}^{3+}$ 氧化产生 $\text{S}^0$ ;  $\text{H}_2\text{S}$ 气膜层在矿物颗粒表面的氧化影响着浸出反应的进行,催化离子的存在有助于破坏 $\text{H}_2\text{S}$ 气膜层,加快氧化过程产生 $\text{S}^0$ <sup>[36]</sup>。同时,矿物表面上生成的致密 $\text{S}^0$ 也会影响矿物表面离子的接触和反应(图1)。然而,催化离子的存在使得浸出溶液具有更高的导电性,矿物颗粒表面的电子传输速率加快,从而使得有价金属的浸出速率加快<sup>[37]</sup>。

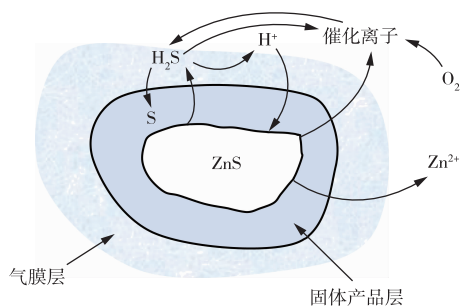


图1 离子催化闪锌矿氧压浸出示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of ion catalyzed oxygen pressure leaching of sphalerite

研究表明, $\text{Cu}^{2+}$ 能加速闪锌矿的溶解<sup>[38]</sup>,当 $\text{Fe}^{2+}$ 和 $\text{Cu}^{2+}$ 共同加入时,闪锌矿表面呈锯齿状, $\text{Fe}^{2+}$ 能够加强 $\text{Cu}^{2+}$ 对闪锌矿的溶解作用<sup>[39-40]</sup>。 $\text{Cl}^-$ 对铁闪锌矿的浸出也有明显的促进作用,原因可能是 $\text{Cl}^-$ 与溶出的 $\text{Fe}^{2+}$ 形成配离子,从而促进了氧化浸出反应。但 $\text{Cl}^-$ 浓度过高会使溶液离子强度过大,使得氧气的溶解度降低<sup>[41-42]</sup>。

### 2.2 温度的影响

在硫化锌精矿氧压浸出过程中,随着加压温度的升高,硫化锌的氧化溶解反应更容易进行,但铁也容易水解沉淀。在其他条件相同时,随温度的升高

锌的浸出率不断增大;铁的浸出率随温度的升高先增大,温度高于 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 后则显著降低(图2)。

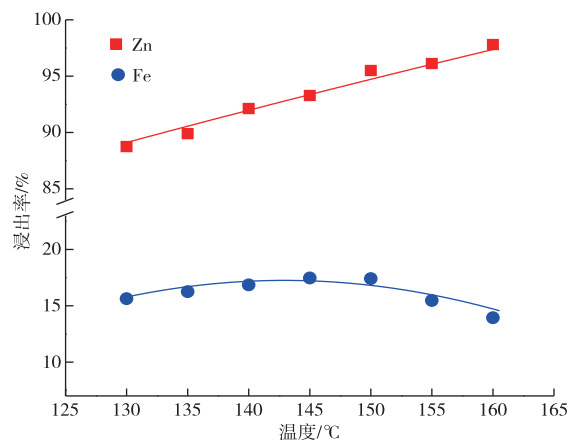


图2 温度对锌、铁浸出率的影响  
Fig. 2 Effects of temperature on leaching rate of zinc and iron

加压浸出过程硫的变化与温度密切相关:温度低于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 时,精矿中硫主要被氧化为 $\text{S}^0$ ;温度高于 $175\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $\text{S}^0$ 被氧化成 $\text{SO}_4^{2-}$ 。熔融的 $\text{S}^0$ 包裹在未反应的矿物颗粒的表面,而聚合的 $\text{S}^0$ 会在反应物表面形成钝化膜,阻碍矿物颗粒与酸溶液的接触,降低反应速率,导致有价金属浸出率低<sup>[29,43]</sup>。

加压浸出的温度通常低于硫的熔点( $119\text{ }^\circ\text{C}$ ),当选择更高的温度时,考虑到硫的聚合问题,一般也不超过 $155\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[44]</sup>。在该温度范围内,为保证较高的锌浸出率,铁尽可能入渣,必须控制合理的浸出终酸浓度<sup>[45]</sup>。

### 2.3 酸度的影响

硫酸浓度是影响氧压浸出速率和浸出率的主要因素。一般来说,酸浓度越高,金属浸出率越高,有利于金属锌的溶出,同时也会促进杂质金属的溶出,不利于杂质金属的分离。浸出终酸浓度过大,会促进渣中铁沉淀物的重新溶解,不利于浸出液的净化<sup>[24]</sup>。

硫酸浓度过高,会导致氧气在溶液中的溶解度降低<sup>[46]</sup>,溶液中各离子的活性受到影响,有价金属离子难以溶解<sup>[47]</sup>。通常在保证有价金属溶出的情况下,尽可能选择低酸,一是降低酸的消耗,二是降低杂质金属的溶出率。

### 2.4 分散剂的影响

在加压浸出过程中,硫可生成多种硫化物,最终以单质硫形式存在于渣中。温度过高时,单质硫可变成熔融的液态硫包裹未溶完的矿物颗粒,造成矿物颗粒无法与浸出液接触,从而影响闪锌矿的继续溶解<sup>[48]</sup>。在闪锌矿的氧压浸出过程中,通常添加木

质素、木质素磺酸盐、丹宁化合物等作为硫的分散剂,其中,木质素磺酸盐作为常见。这类硫分散剂能够完全溶解于酸性溶液,其分子吸附在矿物表面将矿物颗粒与单质硫分离,改善矿物颗粒与溶液的接触,但需要注意的是,这类硫分散剂在高温强氧化条件下容易分解失效。

有研究将煤应用于闪锌矿的加压浸出并取得了很好的效果。将褐煤、烟煤、无烟煤与木质素磺酸钠作为硫分散剂进行比较发现:用褐煤做硫分散剂时,可以取得与木质素磺酸钠同样的浸出效果;而烟煤、无烟煤的分散效果较差。因此,低碳煤具有良好的硫分散效果,但会抑制黄铁矿的浸出<sup>[49]</sup>,抑制机理与木质素磺酸钠分离元素硫相似,都是通过降低颗粒表面与水的界面张力实现分离效果<sup>[50-51]</sup>。

除此之外,还有浸出时间、液固比、搅拌速率因素等的影响。一般来说,在一定的范围内,有价金属元素的浸出率随浸出时间、液固比、搅拌速率的增大而升高,到达一定浸出率后升高不再明显。

### 3 浸出过程伴生元素行为

#### 3.1 铁的浸出行为

在硫化锌精矿加压浸出过程中,铁的变化规律分为铁矿物的溶解和铁离子的沉淀。精矿中含铁矿物溶解产生的铁离子,作为浸出体系中传递氧的介质参与硫化锌的氧化溶解反应,反应后期铁离子发生水解反应沉淀入渣<sup>[52]</sup>。

氧压浸出反应的温度、酸度对铁的浸出行为影响显著。随温度升高,含铁矿物不断溶解,铁的浸出率也随之升高;达到一定温度后,溶出的铁发生水解反应,开始形成铁的氢氧化物和氧化物进入渣中,浸出液中铁含量降低,不利于浸出反应的进行。酸度过小时,含铁矿物的浸出和铁离子沉淀都趋于增大;酸度过大时,渣中形成的铁沉淀又会被溶解,铁离子重新进入浸出液,从而导致浸出液中铁离子浓度增大,对后续除杂净化过程造成困难<sup>[53]</sup>。

#### 3.2 镓、锗、铟的浸出行为

闪锌矿是提取稀散金属镓、锗、铟的主要来源之一,镓、锗、铟在闪锌矿中的分布一般与锌的分布一致,因此在选矿过程随闪锌矿进入到精矿产品中<sup>[5]</sup>。

在加压浸出过程中,镓、锗的浸出行为与铁的浸出行为表现出较高的一致性。随硫酸浓度的增大,锌的浸出率升高到一定值(通常可达到98%以上)后保持稳定,而铁、镓、锗的浸出率随硫酸浓度的增大而明显提高<sup>[54]</sup>。在低酸的条件下,降低氧分压,

铁、镓、锗浸出率均有提高。这是由于在低酸(160~180 g/L)条件下,降低氧分压后,铁氧化沉淀率降低,与铁一同沉淀下来的镓、锗含量就较低,这样就使得镓、锗浸出率升高。而在高酸(大于180 g/L)条件下,由于酸含量很高,铁很难形成沉淀,镓、锗也很难随着铁沉淀下来,从而保持了较高的浸出率<sup>[55]</sup>。在硫化锌精矿氧压浸出过程中,镓、锗进入浸出液,再经过预中和、锌粉置换后,富集于锌粉置换渣中<sup>[56-57]</sup>。锌置换渣是回收镓、锗的主要原料<sup>[58]</sup>,主要回收方法主要有碱浸法、酸浸法、湿法-火法联合法、萃取法、电化学法和液膜分离法等<sup>[59]</sup>。

钢常作为锌、铜等有色金属硫化矿的伴生矿物存在<sup>[60]</sup>,其中,75%的钢富集在闪锌矿中<sup>[61]</sup>。在加压浸出过程中,钢的浸出行为与锌的浸出行为较一致,在一定的酸度和温度范围内,浸出率随酸浓度和温度的升高而显著提高<sup>[62]</sup>。

#### 3.3 银、铅、硅的浸出行为

锌精矿中赋存的银、铅、硅等元素,在氧压浸出过程中不易溶解,通常进入浸出渣中,但是需要避免温度、酸度过高造成返溶。大部分的银以自然银和硫化银形式存在,少部分以氧化银、硫酸银、硅酸银等形式存在<sup>[63]</sup>,主要回收方法有浮选法、氯盐法、硫酸盐化焙烧浸出法、硫脲法、浸没熔炼法等<sup>[64]</sup>。精矿中的少量方铅矿在浸出过程中反应生成不溶的硫酸铅和铅铁矾<sup>[65]</sup>,硅在氧压浸出过程中不易溶解,以二氧化硅的形式进入浸出渣<sup>[66]</sup>。

## 4 结论与展望

1)随着当今富矿资源日益减少,低品位、多组分矿物的选冶技术面临巨大的挑战。传统冶金工艺急需进一步的改革和完善,自20世纪以来,加压浸出技术取得了巨大的进步,在湿法炼锌工业中的地位日益凸显。锌精矿氧压浸出工艺正在逐步取代传统湿法炼锌工艺,硫化锌精矿直接氧压浸出时,硫以单质硫形式从浸出渣中回收,避免了焙烧过程中产生SO<sub>2</sub>对环境的污染,同时也节省了烟气处理成本;闪锌矿中伴生稀散金属元素与锌一起溶出到浸出液中,有利于实现有价金属资源综合回收。

2)氧压浸出过程不同工艺操作参数对有价元素行为有显著影响,需要控制合理的温度、酸度、液固比、浸出时间等,尽可能使锌、镓、锗等元素进入到溶液中,铁进入渣中,同时避免铁矾的生成。

3)目前我国氧压浸出技术尚不成熟,有诸多问题需要解决,例如:浸出渣中硫、银等的高效回收和

利用、氧压浸出过程产生的废酸处理等技术需进一步研究和完善。常压富氧直接浸出技术避免了氧压浸出操作控制难度大、高压釜设备制作要求高等问题,同样可实现较高的浸出回收率。但是由于浸出温度在溶液沸点以下,相对于氧压浸出反应速率较慢,浸出时间较长。总的来说,锌精矿氧压浸出作为一种高效清洁的全湿法炼锌技术,具有巨大的发展潜力和广阔的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 杨友文,蔡国庆,沈理达,等.机械合金化与激光烧结制备铁锌过饱和固溶体及其降解行为研究[J].中南大学学报,2021,28(4):1170-1182.  
YANG Y W, CAI G Q, SHEN L D, et al. Fe-Zn supersaturated solid solution prepared by mechanical alloying and laser sintering to accelerate degradation[J]. Journal of Central South University, 2021, 28(4): 1170-1182.
- [2] 薛娟琴,代继哲,王真星,等.石墨烯改性锡酸锌材料的光谱特性及其光催化性能[J].光谱学与光谱分析,2018,38(4):1219-1224.  
XUE J Q, DAI J Z, WANG Z X, et al. Spectral characteristic of graphene modified zinc stannate materials and its photocatalytic properties[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2018, 38(4): 1219-1224.
- [3] 程永发,谢艺梅,严淑文,等.包含高通过率纳米级离子通道和高机械强度的MXene电极用于高容量锌离子储能[J].科学通报,2022,67(21):2216-2224.  
CHENG Y F, XIE Y M, YAN S W, et al. Maximizing the ion accessibility and high mechanical strength in nanoscale ion channel MXene electrodes for high-capacity zinc-ion energy storage[J]. Science Bulletin, 2022, 67(21): 2216-2224.
- [4] 任开睿,徐军,戴佳原,等.锌对病毒性肺炎潜在的医疗价值[J].中国急救医学,2020,40(10):1020-1024.  
REN K R, XU J, DAI J Y, et al. Discussion on the potential medical value of zinc in viral pneumonia[J]. Chinese Journal of Critical Care Medicine, 2020, 40(10): 1020-1024.
- [5] 吴越,孔志岗,陈懋弘,等.扬子板块周缘MVT型铅锌矿床闪锌矿微量元素组成特征与指示意义:LA-ICPMS研究[J].岩石学报,2019,35(11):3443-3460.  
WU Y, KONG Z G, CHEN M H, et al. Trace elements in sphalerites from the Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits around the margins of Yangtze block and its geological implications: a LA-ICPMS study[J]. Acta Petrologica Sinica, 2019, 35(11): 3443-3460.
- [6] 张长青,毛景文,吴锁平,等.川滇黔地区MVT铅锌矿床分布、特征及成因[J].矿床地质,2005(3):336-348.  
ZHANG C Q, MAO J W, WU S P, et al. Distribution, characteristics and genesis of Mississippi Valley-Type lead-zinc deposits in Sichuan-Yunnan-Guizhou area[J]. Mineral Deposits, 2005(3): 336-348.
- [7] 周家喜,黄智龙,周国富,等.贵州天桥铅锌矿床分散元素赋存状态及规律[J].矿物学报,2009,29(4):471-480.  
ZHOU J X, HUANG Z L, ZHOU G F, et al. The occurrence states and regularities of dispersed elements in Tianqiao Pb-Zn ore deposit, Guizhou Province, China[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2009, 29(4): 471-480.
- [8] 童雄,周庆华,何剑,等.铁闪锌矿的选矿研究概况[J].金属矿山,2006,35(6):8-12.  
TONG X, ZHOU Q H, HE J, et al. Research on mineral processing of marmatite ore[J]. Metal Mine, 2006, 35(6): 8-12.
- [9] 雷霆,陈利生,余宇楠,等.锌冶金[M].北京:冶金工业出版社,2013  
LEI T, CHEN L S, YU Y N, et al. Zinc metallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [10] 蒋继穆.我国铅锌冶炼现状与持续发展[J].中国有色金属学报,2004,14(增刊1):52-62.  
JIANG J M. Status and sustainable development of lead and zinc smelting industry in China[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2004, 14(Suppl. 1): 52-62.
- [11] 王子彪,何贵香,占焕武,等.高铜铅冰铜氧压浸出[J].矿冶工程,2022,42(6):122-126.  
WANG Z B, HE G X, ZHAN H W, et al. Oxygen pressure leaching of lead matte with high content of copper [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2022, 42(6): 122-126.
- [12] SAHU S K, SAHU K K, PANDEY B D. Leaching of zinc sulfide concentrate from the Ganesh-Himal deposit of Nepal[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37(4): 541-549.
- [13] ÇOPUR M, ÖZMETİN C, ÖZMETİN E, et al. Optimization study of the leaching of roasted zinc sulphide concentrate with sulphuric acid solutions[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 2004, 43(8): 1007-1014.
- [14] 唐建文,谢克强,韩开远,等.高铁锌精矿加压浸出工艺杂质行为研究[J].中国有色冶金,2020,49(6):70-74.  
TANG J W, XIE K Q, HAN K Y, et al. Study on impurity behavior in pressure leaching process for high-iron zinc concentrate [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2020, 49(6): 70-74.
- [15] 李存兄,魏昶,樊刚,等.高硅氧化锌矿加压酸浸处

- 理[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(9): 1678-1683.  
LI C X, WEI C, FAN G, et al. Pressure acid leaching of high silicon zinc oxide ore[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(9): 1678-1683.
- [16] 江城. 氧压浸出处理黑铜泥[J]. 有色金属(冶炼部分), 2022(7): 24-29.  
JIANG C. Treatment of black copper mud by oxygen pressure leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022(7): 24-29.
- [17] HAAKANA T, LAHTINEN M, TAKALA H, et al. Development and modelling of a novel reactor for direct leaching of zinc sulphide concentrates [J]. Chemical Engineering Science, 2007, 62(18/19/20): 5648-5654.
- [18] DERRY R. Pressure hydrometallurgy: a review [M]. [S. l.]: Warren Spring Laboratory, 1972
- [19] 陈锋. 中国氧压浸出炼锌工艺技术概论[J]. 中国有色冶金, 2015, 44(6): 21-25.  
CHEN F. An outline of China oxygen pressure leaching zinc technology [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2015, 44(6): 21-25.
- [20] WANG Y F, JIANG K X, MA H, et al. The behavior of zinc and iron in neutralized residue during pressure leaching[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2022, 39(2): 847-854.
- [21] 仝一喆. 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 oxygen pressure leach process [J]. Mining and Metallurgy, 2011, 20(4): 94-97.
- [22] 张爽, 李杨, 冯好, 等. 用绿矾从氧化锌中氧压浸出锌并同步分离铁[J]. 湿法冶金, 2022, 41(3): 185-190.  
ZHANG S, LI Y, FENG H, et al. Oxygen pressure leaching of Zn from zinc oxide ore using  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  and synchronous separation of Fe[J]. Hydrometallurgy of China, 2022, 41(3): 185-190.
- [23] XI J J, JI G X, LIAO Y L, et al. Research on separation and extraction of valuable metals from complex non-ferrous metals resources by high pressure oxygen leaching methodology: a review [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2022, 8(1): 51-63.
- [24] 谢锋, 蒋开喜, 王海北, 等. 硫化矿加压浸出机理研究进展[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023.  
XIE F, JIANG K X, WANG H B, et al. Research progress on pressure leaching mechanism of sulfide ore[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2023.
- [25] LI C X, WEI C, XU H S, et al. Oxidative pressure leaching of sphalerite concentrate with high indium and iron content in sulfuric acid medium[J]. Hydrometallurgy, 2010, 102(1/2/3/4): 91-94.
- [26] TIAN L, GONG A, WU X G, et al. Oxygen pressure acid leaching of artificial sphalerite catalyzed by  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$  self-precipitation[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(6): 1703-1713.
- [27] 王吉坤, 周廷熙, 吴锦梅. 高铁闪锌矿精矿加压酸浸新工艺研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2004(1): 5-8.  
WANG J K, ZHOU T X, WU J M. Research on a new pressure acid leaching process for high iron sphalerite concentrate[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2004(1): 5-8.
- [28] 王吉坤, 周廷熙. 硫化锌精矿加压酸浸技术及产业化[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.  
WANG J K, ZHOU T X. Pressurized acid leaching technology and industrialization of zinc sulfide concentrate[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2005.
- [29] 刘野平, 胡东风, 周东风. 硫化锌精矿氧压浸出过程硫的酸化研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(8): 35-37.  
LIU Y P, HU D F, ZHOU D F. Study on sulfation of elemental sulfur during oxygen pressure leaching of zinc sulfide concentrates [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(8): 35-37.
- [30] 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, 21.  
LI R G. Atmospheric oxygen-rich direct leaching of zinc concentrate [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2009, 38(3): 12-15, 21.
- [31] 高文成, 王振银, 温建康, 等. 锌氧压渣中铁复相强化溶出规律及浸出动力学[J]. 有色金属(冶炼部分), 2020(9): 12-18.  
GAO W C, WANG Z Y, WEN J K, et al. Enhanced leaching of complex phase of iron from residue of zinc pressure leaching and its dissolution kinetics [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2020(9): 12-18.
- [32] 周小元. 锌氧压浸出过程控制系统设计与实现[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.  
ZHOU X Y. Design and implementation of a control system for zinc oxygen pressure leaching process[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Technology, 2014.
- [33] LI Y B, KAWASHIMA N, LI J C, et al. A review of the structure, and fundamental mechanisms and kinetics of the leaching of chalcopyrite[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2013, 197-198: 1-32.
- [34] 付中梦, 邓志敢, 魏昶, 等. 锌精矿与锌浸渣协同浸出及氧化转化行为[J]. 中国有色金属学报, 2018, 28(10): 2086-2093.

- FU Z M, DENG Z H, WEI C, et al. Simultaneous leaching of zinc residue and zinc concentrate and oxidative conversion behavior[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2018, 28(10): 2086-2093.
- [35] 陈建华, 陈晔, 曾小钦, 等. 铁杂质对闪锌矿表面电子结构及活化影响的第一性原理研究[J]. 中国有色金属学报, 2009, 19(8): 1517-1523.
- CHEN J H, CHEN Y, ZENG X Q, et al. First principle study of effect of Fe impurity on electronic structure and activation of sphalerite surface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2009, 19(8): 1517-1523.
- [36] ZHUKOV V V, LAARI A, LAMPINEN M, et al. A mechanistic kinetic model for direct pressure leaching of iron containing sphalerite concentrate[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017, 118: 131-141.
- [37] 陈丽杰, 龚傲, 吴选高, 等. 闪锌矿加压浸出体系下  $Mn^{2+}$  催化机理与动力学[J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(9): 2151-2161.
- CHEN L J, GONG A, WU X G, et al. Catalytic mechanism and kinetics of  $Mn^{2+}$  under sphalerite pressure leaching system[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(9): 2151-2161.
- [38] LIU Z X, YIN Z L, HU H P, et al. Catalytic-oxidative leaching of low-grade complex zinc ore by  $Cu(II)$  ions produced from copper ore in ammonia-ammonium sulfate solution[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(5): 1019-1026.
- [39] 田磊. 闪锌矿富氧加压浸出过程的基础研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2017.
- TIAN L. Basic research on the oxygen rich pressure leaching process of sphalerite [D]. Shenyang: Northeastern University, 2017.
- [40] 张振健, 毛铭华. 铁离子催化辉铜矿氧压酸浸过程的研究[J]. 有色金属, 1990, 42(3): 64-68.
- ZHANG Z J, MAO M H. Kinetic studies on iron catalysed acid pressure leaching of chalcocite [J]. Nonferrous Metals, 1990, 42(3): 64-68.
- [41] WATLING H R. Chalcopyrite hydrometallurgy at atmospheric pressure: 2. review of acidic chloride process options[J]. Hydrometallurgy, 2014, 146: 96-110.
- [42] QUIJADA-MALDONADO E, OLEA F, SEPÚLVEDA R, et al. Possibilities and challenges for ionic liquids in hydrometallurgy [J]. Separation and Purification Technology, 2020, 251: 117289. DOI: 10. 1016/j. seppur. 2020. 117289.
- [43] 邓志敢, 孙朴, 魏昶, 等. 锌精矿氧压浸出过程伴生硫铁矿的转化行为[J]. 有色金属工程, 2022, 12(9): 65-72.
- DENG Z G, SUN P, WEI C, et al. Transformation behavior of pyrite in zinc concentrate oxygen pressure leaching process [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9): 65-72.
- [44] WU L L, YANG X Y, XU H, et al. Kinetic study of high-pressure acid leaching of Mg and Ni from serpentine [J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 410-419.
- [45] 周双. 硫化锌精矿氧压浸出过程中硫转化规律的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015.
- ZHOU S. Research on the law of sulfur conversion during oxygen pressure leaching of zinc sulfide concentrate [D]. Shenyang: Northeastern University, 2015.
- [46] 马荣骏. 湿法冶金原理 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007.
- MA R J. Principles of hydrometallurgy [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007.
- [47] 牟望重, 张延安, 吕国志, 等. 硫化锌氧压浸出过程的  $\varphi$ -pH 图 [J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(8): 1636-1644.
- MOU W Z, ZHANG T A, LYU G Z, et al.  $\varphi$ -pH figure during oxidative pressure leaching of zinc sulfide [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(8): 1636-1644.
- [48] OWUSU G, DREISINGER D B, PETERS E. Effect of surfactants on zinc and iron dissolution rates during oxidative leaching of sphalerite [J]. Hydrometallurgy, 1995, 38(3): 315-324.
- [49] 徐志峰, 邱定蕃, 王海北. 煤在铁闪锌矿氧压酸浸中的应用 [J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(5): 939-945.
- XU Z F, QIU D F, WANG H B. Application of coal in oxidative pressure leaching of marmatite concentrates [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(5): 939-945.
- [50] 王帆, 王吉坤, 贺山明, 等. 二段加压浸出中硫的行为 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2010(3): 21-24.
- WANG F, WANG J K, HE S M, et al. The behavior of sulfur in two steps pressure acid leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2010(3): 21-24.
- [51] 徐静, 王吉坤, 王帆. 氧压酸浸中分散剂对硫的影响 [J]. 稀有金属, 2010, 34(增刊 1): 84-87.
- XU J, WANG J K, WANG F. Effect of dispersant on sulfur during oxidative pressure leaching of sphalerite [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2010, 34(Suppl. 1): 84-87.
- [52] 凡杰. 硫化锌精矿氧压酸浸过程中铁离子的作用机理 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- FAN J. Action mechanism of iron ions during oxygen

- pressure acid leaching of zinc sulfide concentrate[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2021.
- [53] SOUZA A D, PINA P S, LEÃO V A, et al. The leaching kinetics of a zinc sulphide concentrate in acid ferric sulphate[J]. *Hydrometallurgy*, 2007, 89(1/2): 72-81.
- [54] 刘付朋, 刘志宏, 李玉虎, 等. 锌粉置换镓锗渣高压酸浸的浸出机理[J]. *中国有色金属学报*, 2014, 24(4): 1091-1098.
- LIU F P, LIU Z H, LI Y H, et al. Leaching mechanism of zinc powder replacement residue containing gallium and germanium by high pressure acid leaching[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(4): 1091-1098.
- [55] 张兆闫, 李存兄, 戴兴征, 等. 含镓锌浸出渣加压强化浸出及铁沉淀行为[J]. *中国有色金属学报*, 2022, 32(11): 3456-3469.
- ZHANG Z Y, LI C X, DAI X Z, et al. Pressure enhanced leaching and iron precipitation behavior of germanium containing zinc leaching residue [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2022, 32(11): 3456-3469.
- [56] 尹朝晖. 从丹霞冶炼厂锌浸出渣中综合回收镓和锗[J]. *有色金属*, 2009, 61(4): 94-97.
- YIN Z H. Comprehensive recovery of Ga and Ge from leaching residue of Danxia zinc smelter[J]. *Nonferrous Metals*, 2009, 61(4): 94-97.
- [57] 刘付朋, 刘志宏, 李玉虎, 等. 锌粉置换镓锗渣硫酸浸出过程[J]. *中国有色金属学报*, 2016, 26(4): 908-918.
- LIU F P, LIU Z H, LI Y H, et al. Sulfuric leaching process of zinc powder replacement residue containing gallium and germanium [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2016, 26(4): 908-918.
- [58] 王海北, 李贺, 王玉芳. 稀贵金属加压浸出技术现状及展望[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2021(6): 1-9.
- WANG H B, LI H, WANG Y F. Status and prospect on pressure leaching technologies for rare and precious metals[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2021(6): 1-9.
- [59] 温盛汇, 龚傲, 徐家聪, 等. 锌氧压浸出渣中金属综合回收工艺研究进展[J]. *湿法冶金*, 2023, 42(3): 236-240.
- WEN S H, GONG A, XU J C, et al. Research progress on metal comprehensive recovery from zinc-oxygen pressure leaching residue [J]. *Hydrometallurgy of China*, 2023, 42(3): 236-240.
- [60] 李学鹏, 刘大春, 王娟. 低含铜浸出渣中铜的氧压酸浸实验及动力学研究[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2018, 49(8): 1869-1877.
- LI X P, LIU D C, WANG J. Experimental and kinetic study on oxygen pressure acid leaching of indium from low-content indium-containing leaching residue [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2018, 49(8): 1869-1877.
- [61] 张伟波, 陈秀法, 陈玉明, 等. 全球铜矿资源供需现状与我国开发利用建议[J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(5): 1-8.
- ZHANG W B, CHEN X F, CHEN Y M, et al. Current status of supply and demand of global indium mineral resources and suggestions for development and utilization in China [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(5): 1-8.
- [62] 韦岩松, 吴志鸿, 张燕娟, 等. 含铜锌渣氧粉加压氧化浸铜的工艺研究[J]. *金属矿山*, 2009, 28(11): 73-75.
- WEI Y S, WU Z H, ZHANG Y J, et al. Research on the process for extracting indium from zinc oxide flue dust by pressure oxidation leaching [J]. *Metal Mine*, 2009, 28(11): 73-75.
- [63] 魏昶, AMIRKHON J, 简单, 等. 湿法炼锌浸出渣减量浸出工艺[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2022(5): 1-7.
- WEI C, AMIRKHON J, JIAN D, et al. Decrement leaching process of zinc leaching residue [J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022(5): 1-7.
- [64] 衷水平, 杜涛, 翁威, 等. 锌浸出渣水浸预处理一分段硫化浮选回收银试验研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2023(2): 54-62.
- ZHONG S P, DU T, WENG W, et al. Experimental study on silver recovery from zinc leaching residue by water leaching pretreatment-staged sulfurization flotation [J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2023(2): 54-62.
- [65] 徐斌, 钟宏, 王魁斑, 等. 复杂铜铅锌银混合精矿两段逆流氧压浸出工艺[J]. *中国有色金属学报*, 2011, 21(4): 901-907.
- XU B, ZHONG H, WANG K T, et al. Two stage adverse current oxygen pressure acid leaching of complex Cu-Pb-Zn-Ag bulk concentrate [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2011, 21(4): 901-907.
- [66] 孙朴, 邓志敢, 魏昶, 等. 复杂高铅低铁硫化锌精矿氧压浸出[J]. *有色金属工程*, 2021, 11(10): 54-63.
- SUN P, DENG Z G, WEI C, et al. Oxygen pressure leaching of complex high lead and low iron zinc sulfide concentrate [J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2021, 11(10): 54-63.