# 富锗锌精矿协同浸出锌锗工艺研究

俸智超[1],庞沛彦[2],蒋学先[2],何贵香[2],周街荣[2],李中林[1],李义兵[1]

(1.桂林理工大学 材料科学与工程学院,广西 桂林 541004;
2.桂林理工大学南宁分校 冶金与资源工程学院,广西 南宁 530001)

**摘要**:研究了采用氧压浸出工艺从富锗锌精矿中浸出锌、锗,系统考察了硫酸初始酸度、反应温度、浸出时间、氧分压、木质素磺酸钠添加量、液固体积质量比、搅拌速度等关键因素对锌、锗浸出率的影响。通过单因素试验优化确定氧压浸出最佳工艺条件为:浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、硫酸初始酸度 160 g/L、氧分压 1.2 MPa、木质素磺酸钠添加量 1 g、液固体积质量比 8/1、搅拌速度 600 r/min,该条件下锗浸出率达 94.86%,锌浸出率达 99.98%。与传统常压浸出相比,优化后的氧压工艺锗浸出率可提升 15%以上,浸出时间缩短 40%,还可避免高浓度 $H_2S$ 气体排放,减少对环境的污染,可为实现锌精矿中有价元素的综合利用提供技术参考。

**关键词**:富锗锌精矿;氧压浸出;锌;锗;硫酸

**中图分类号**:TF803.21;TF813　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1009-2617(2026)01-0031-08

**DOI**:10.13355/j.cnki.sfyj.2026.01.005

锗在地壳中含量稀少,主要作为伴生元素存在于锌、铅、铜等矿石中,少数以独立矿物形式存在。目前锗的回收主要依托于含锗硫化锌精矿的多金属协同综合利用工艺。锗作为一种重要的战略性金属矿产,已被多国列为战略性关键矿产资源,并广泛应用于光电、半导体、化工等领域[1-4]。因此,开发高效、环保提锗技术成为了解决这一问题的关键。

目前,锌精矿提锗以湿法为主导,常见工艺包括常压酸浸、加压酸浸、碱浸法、溶剂萃取法及氧压浸出等。常压酸浸操作条件温和、经济性较好,但其浸出速率较慢,通常耗时 10～20 h 才能实现 95%以上的锗浸出率[5-6]。加压酸浸则利用高温高压条件强化锗的浸出,需额外热源维持压力并精确控制参数,存在能耗高、技术复杂、设备维护成本高等问题,且锗浸出率通常难以突破 94%[7-8]。碱浸法基于锗的氧化物在碱性溶液中的溶解特性,可降低杂质干扰并实现选择性分离,流程相对简单且碱液可循环利用,但当原料中含有硅成分时,该法不适用[9-13]。溶剂萃取法是从浸出液中选择性回收金属元素的有效手段,具有分离系数高、饱和容量大、流程简单、可连续操作等优势[14];但萃取剂价格昂贵、使用条件苛刻等因素限制了其工业规模化应用[15]。氧压浸出凭借其锌锗浸出率高、原料适应性强及回收率高等显著优势[16],已成为当前国内外研究热点,如针对氧化锌烟尘采用常压酸浸—氧压高酸浸出工艺[17],针对含锗锌精矿采用氧压酸浸工艺[18]。上述工艺虽能实现高效浸出锗,但大多存在蒸汽消耗量大、设备维护成本高等问题。目前,从含锗锌精矿中提锗的工艺主要为一段酸浸+二段高酸浸出的两段逆流浸出工艺[19],但经长期的生产实践证明,该工艺流程长,且会消耗更多的酸,导致成本增加。可见现有氧压浸出工艺在实现锗的完全浸出方面仍有提升空间。因此,深入研究氧压浸出工艺参数优化,对进一步提高锌、锗浸出率具有重要意义。

试验针对富锗锌精矿常规浸出工艺中的锗浸

**收稿日期**:2025-07-28;**修订日期**:2025-08-25

**基金项目**:广西自然科学基金(2025GXNSFAA069249);中央引导地方科技发展资金项目(桂科 ZY24212040)。

**第一作者简介**:俸智超(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为有色金属冶炼。

**通信作者简介**:何贵香(1973—),女,博士,教授,主要研究方向为有色金属冶炼。E-mail:hgx@glut.edu.cn。

出不完全问题，通过 X 射线衍射（XRD）与扫描电子显微镜（SEM）技术对原料物相组成与微观形貌进行表征，采用单因素试验确定了氧压酸浸工艺中温度、时间、初始硫酸浓度、氧分压、木质素磺酸钠添加量、液固体积质量比及搅拌速度 7 个关键参数的最优值。

## 1 试验部分

### 1.1 试验原料及试剂

试验原料为富锗锌精矿，由广西某公司提供，用球磨机将其破碎研磨至粒度小于 0.074 mm（200 目），占比≥95%，保证反应的比表面积一致，并将样品置于 80 ℃的鼓风干燥箱内，烘干密封，保存备用。

对试验原料中锌、硫、铁、硅、铝、锗 6 个元素进行定量分析，其结果见表 1。可知，锗元素质量分数达 $6.44\times10^{-4}$，明显高于当前湿法炼锌行业常用富锗锌精矿中的锗含量。

表 1 富锗锌精矿的主要化学组成

Table 1 Main chemical composition of germanium-rich zinc concentrate %

| Zn | S | Fe | Si | Al | Ge |
|---|---|---|---|---|---|
| 50.39 | 33.92 | 6.36 | 1.90 | 0.25 | 0.064 4 |

试剂：工业瓶装氧气（$O_2$，纯度≥99.9%），浓硫酸（$H_2SO_4$，高纯，98%），木质素磺酸钠（$CHNa_2OS_2$，分析纯）。

### 1.2 富锗锌精矿的氧压酸浸出

按照一定的液固体积质量比，准确称取富锗锌精矿样品，并量取 300 mL 一定浓度的硫酸。先将硫酸注入高压反应釜的石英内衬，随后缓慢加入富锗锌精矿样品以防止粉尘扩散和物料结块。将内衬置于反应釜中，设定氧压、浸出温度、时间和搅拌速度。浸出结束后停止加热与搅拌，打开出气口泄压至常压。待釜内温度自然降至 90 ℃左右，取出石英内衬。将浸出浆料转移至烧杯，并用蒸馏水洗涤内衬残留物 2～3 次，收集，保存备用。富锗锌精矿氧压酸浸过程涉及的主要反应如下：

$$2ZnS+2H_2SO_4+O_2=\!=\!=2ZnSO_4+2H_2O+2S \quad (1)$$

$$GeS_2+4O_2+2H_2O=\!=\!=GeO_2+2H_2SO_4 \quad (2)$$

$$GeO_2+2H_2SO_4=\!=\!=Ge(SO_4)_2+2H_2O \quad (3)$$

将两个烧杯中的浸出浆料依次用真空泵进行过滤，并将过滤后的浸出渣置于 80 ℃鼓风干燥箱内烘干，烘干后用电子天平测定浸出渣质量。用 X 射线荧光光谱分析仪测定浸出渣中锌、锗含量，并计算浸出率。计算公式如下：

$$\alpha=\frac{m_1w_1-m_2w_2}{m_1w_1}\times100\% \quad (4)$$

式中：$\alpha$—锌或锗浸出率（按渣计），%；$m_1$—富锗锌精矿质量，g；$m_2$—烘干后浸出渣量，g；$w_1$—富锗锌精矿中锌或锗质量分数，%；$w_2$—浸出渣中锌或锗质量分数，%。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 富锗锌精矿特性分析

#### 2.1.1 XRD 分析

采用 X 射线衍射仪对富锗锌精矿的物相组成进行分析，结果如图 1 所示。

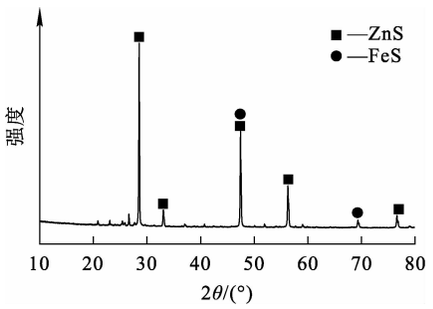



图 1 富锗锌精矿的 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of germanium-rich zinc concentrate

由图 1 可知，富锗锌精矿的主要物相为闪锌矿（ZnS），并伴生少量的硫化亚铁。由于锗元素在原料中的含量低于 X 射线衍射分析的检测灵敏度，所以其特征衍射峰未在谱图中出现。从物相构成来看，矿物中未发现其他杂质相，表明富锗锌精矿的整体矿物组成结构简单，无复杂的异相干扰。

#### 2.1.2 SEM 分析

为明确锗元素在富锗锌精矿中的微观存在形态及赋存特征，采用扫描电子显微镜（SEM）技术对样品进行微观形貌观察与微区元素分布分析，结果如图 2、3 所示。

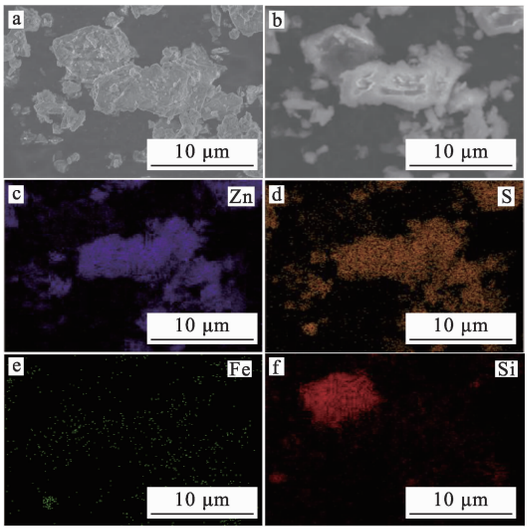



**图 2　富锗锌精矿 SEM 图像(a)～(b)及面扫照片(c)～(f)**

**Fig. 2　SEM images (a)－(b) and surface scanning images (c)－(f) of germanium-rich zinc concentrate**

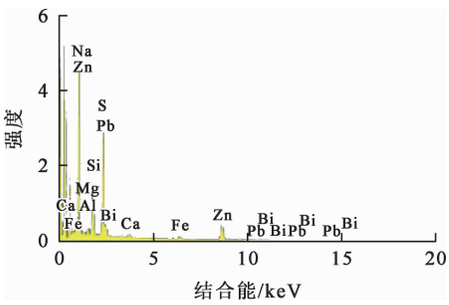



**图 3　富锗锌精矿 EDS 面扫总谱**

**Fig. 3　Total spectrum of EDS surface scanning of germanium-rich zinc concentrate**

由图 2 可知：Zn 元素分布广泛且呈团块状聚集，表明其在富锗锌精矿中高度富集；S 元素的分布与 Zn 元素表现出强烈的空间耦合性，证实锌主要以 ZnS 物相存在，符合锌精矿的典型矿物学特征；Fe 元素分布较为弥散且含量较低，表明其可能赋存于黄铁矿等次要矿物中，在氧压浸出过程中可能部分氧化溶解，进而干扰锌、锗的浸出行为；而 Si 元素则呈现明显的聚集分布，推测其来源于石英等脉石矿物，在后续浸出过程中易形成含硅渣相。

由图 3 可知：Zn 元素的特征峰较为明显，表明 Zn 在样品中含量相对较高；Fe 元素的存在可能会影响浸出过程的物相转化；S 元素的特征峰也很明显，表明 S 主要以硫化物形式存在，最常见的是与锌结合形成 ZnS；而 Ca、Si、Al、Mg、Na 等元素特征峰的存在，表明原料中可能含有硅酸盐、碳酸盐等脉石矿物，这些非目标矿物相可能在浸出过程中影响传质或形成副产物；未出现 Ge 元素的特征峰，可能是锗在富锗锌精矿中的含量相对较低，或锗的赋存状态是以极微量、高度分散形式存在所致。

## 2.2　浸出影响因素分析

### 2.2.1　浸出温度对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 180 g/L、浸出时间 90 min、搅拌速度 600 r/min、液固体积质量比 8/1、氧分压 1.2 MPa、木质素 1 g 条件下，研究浸出温度对锌、锗浸出率的影响，结果如图 4 所示。

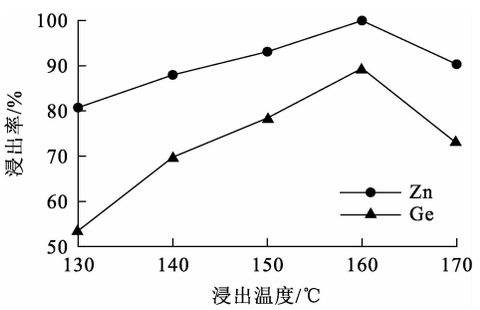



**图 4　不同浸出温度下的锌、锗浸出率**

**Fig. 4　Leaching rates of zinc and germanium under different leaching temperatures**

由图 4 可知，浸出温度对锌、锗浸出率的影响趋势一致，锌、锗浸出率随温度升高均呈先升后降趋势：温度从 130 ℃升至 160 ℃时，锌、锗浸出率分别从 80.73%、53.49%升至 99.98%、89.42%；但进一步升温至 170 ℃，锌、锗浸出率分别降至 90.33%、72.85%。温度对氧压浸出的反应速率有多方面影响，适度升高温度有利于反应物的溶解并加快反应速率；但温度过高则可能会加剧 Fe 的水解沉淀[20]，并可能导致铁矾及铁化合物沉淀夹带或吸附锗元素进入渣相[21]；此外，高温下也可能形成不溶性锗酸盐或其他化合物，从而抑制浸出。综合考虑浸出效果及反应机制，确定最佳浸出温度为 160 ℃。

### 2.2.2　浸出时间对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 180 g/L、浸出温度 160 ℃、搅拌速度 600 r/min、液固体积质量比 8/1、氧分压 1.2 MPa、木质素 1 g 条件下，研究

浸出时间对锌、锗浸出率的影响，结果如图 5 所示。

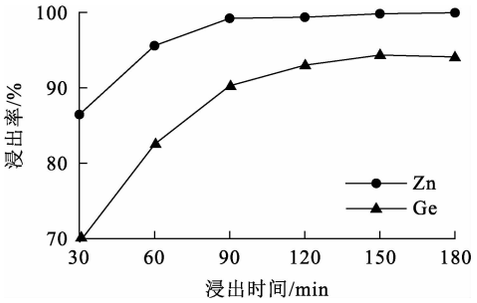



**图 5 不同浸出时间下的锌、锗浸出率**

**Fig. 5 Leaching rate of zinc and germanium under different leaching times**

由图 5 可知，随浸出时间延长，锌、锗浸出率呈先快速上升后趋于平缓趋势：浸出时间从 30 min延长至 150 min 时，锌、锗浸出率分别从 86.47%、69.53%提升至 99.84%、94.37%，这是延长浸出时间可使反应更充分进行所致；继续延长浸出时间至 180 min，锌浸出率升高幅度较小，锗浸出率则略有下降，表明在浸出150 min 后，锗的浸出过程逐渐因硫膜包裹或已达到反应平衡[22]。综合考虑，确定最佳浸出时间为 150 min。

### 2.2.3 硫酸初始质量浓度对锌、锗浸出率的影响

在浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、搅拌速度 600 r/min、液固体积质量比 8/1、氧分压 1.2 MPa、木质素 1 g 条件下，研究硫酸初始质量浓度对锌、锗浸出率的影响，结果如图 6 所示。

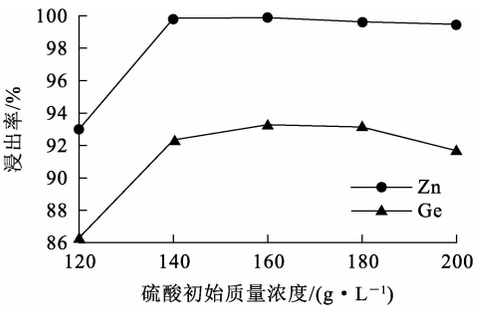



**图 6 不同硫酸初始质量浓度下的锌、锗浸出率**

**Fig. 6 Leaching rate of zinc and germanium under different initial sulfuric acid concentrations**

由图 6 可知，当硫酸初始酸度从 120 g/L 增至 160 g/L 时，锌、锗浸出率分别从 93.00%、86.30%升至 99.88%、93.28%。这是 $H^+$ 浓度升高加速矿物分解所致。此过程涉及的反应式如下：

$$ZnS+2H^+ \longrightarrow Zn^{2+}+H_2S\uparrow \quad (5)$$

$$2H_2S+O_2 \longrightarrow 2S\downarrow+2H_2O \quad (6)$$

$$GeO(OH)_2+2H^+ \longrightarrow GeO^{2+}+2H_2O \quad (7)$$

硫酸初始质量浓度为 180 g/L 时，锌、锗浸出率无明显变化；但当硫酸初始浓度增至 200 g/L 时，锌、锗浸出率分别降至99.47%、91.68%。这可能是硫酸浓度过高使得硅生成硅胶等胶状物，将还没来得及反应的矿物颗粒包裹，阻碍传质所致。综合考虑，确定最佳硫酸初始质量浓度为 160 g/L。

### 2.2.4 氧分压对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 160 g/L、浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、搅拌速度 600 r/min、液固体积质量比 8/1、木质素 1 g 条件下，研究氧分压对锌、锗浸出率的影响，结果如图 7 所示。

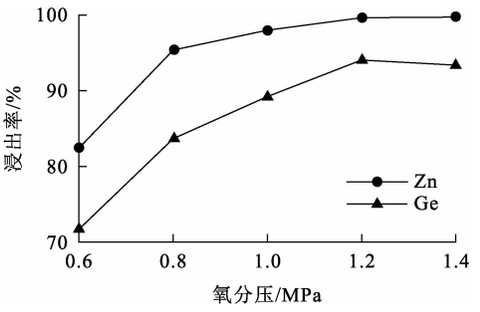



**图 7 不同氧分压下的锌、锗浸出率**

**Fig. 7 Leaching rate of zinc and germanium under different oxygen partial pressures**

由图 7 可知，随氧分压从 0.6 MPa 升至 1.2 MPa，锌、锗浸出率分别从 82.42%、71.70%升至99.66%、94.07%。这是由于氧分压升高可使溶液中溶解氧浓度增大，强化了以下反应所致。

$$ZnS+2H^++O_2 \longrightarrow Zn^{2+}+S\downarrow+H_2O \quad (8)$$

$$GeO+2H^+ \longrightarrow Ge^{2+}+H_2O$$

$$(伴随氧化\ Ge^{2+} \longrightarrow Ge^{4+}) \quad (9)$$

在氧压浸出过程中，溶解氧作为氧化剂，能促进闪锌矿晶格的破坏及锗的氧化溶解，同时加速 $Fe^{2+}$ 氧化为 $Fe^{3+}$，形成 $Fe(OH)_3$ 胶体并吸附部分锗离子，继而将 ZnS 中的 $S^{2-}$ 氧化为单质 S，以维持浸出反应的进行[23]。因此，浸出过程须确保提供

足够的溶解氧。在一定的压力范围内，氧气的溶解度随压力增大而增大，氧溶解度越大，氧气越充足，越有利于加速氧化反应。当氧分压超过1.2 MPa时，锗浸出率趋于稳定，氧分压由 1.2 MPa 升至 1.4 MPa后，锌浸出率变化不大，而锗浸出率略有下降。综合考虑能耗和设备耐压要求，确定最佳氧分压为 1.2 MPa。

### 2.2.5　木质素磺酸钠添加量对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 160 g/L、浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、氧分压 1.2 MPa、搅拌速度 600 r/min、液固体积质量比 8/1 条件下，研究木质素磺酸钠添加量对锌、锗浸出率的影响，结果如图 8 所示。

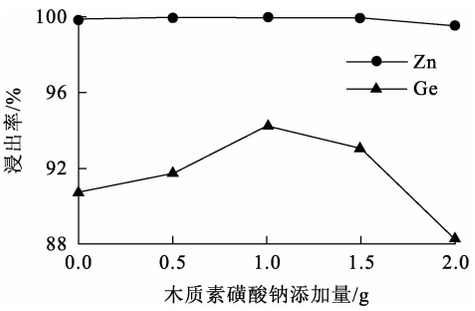



**图 8　不同木质素磺酸钠添加量下的锌、锗浸出率**

**Fig. 8　Leaching rate of zinc and germanium under different sodium lignosulfonate additions**

由图 8 可知：随木质素磺酸钠添加量增加，锗浸出率升高，当添加量增至 1 g 时，锗浸出率达最大，为 94.24%，这是因为木质素磺酸钠可改变富锗锌精矿中硫元素的表面性质和表面能，消除单质硫对矿物的包裹，从而促进富锗锌精矿中锗的浸出[24-25]；继续添加木质素至 2 g 时，锗浸出率降至 88.22%，这可能是其他副反应发生导致，亦或是木质素对矿物形成反包裹所致[26]；而锌浸出率随木质素磺酸钠添加量增加无明显变化。综合考虑，确定最佳木质素磺酸钠添加量为 1 g。

### 2.2.6　液固体积质量比对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 160 g/L、浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、搅拌速度 600 r/min、氧分压 1.2 MPa、木质素 1 g 条件下，研究液固体积质量比对锌、锗浸出率的影响，结果如图 9 所示。

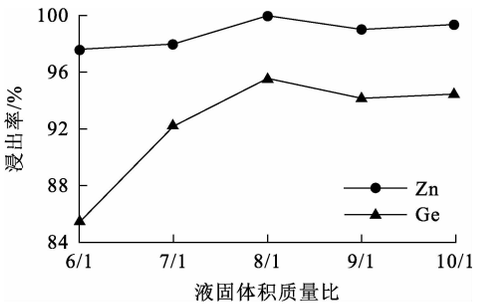



**图 9　不同液固体积质量比下的锌、锗浸出率**

**Fig. 9　Leaching rate of zinc and germanium under different liquid volume to solid mass ratios**

由图 9 可知，液固体积质量比从 6/1 增至8/1时，锌、锗浸出率分别由 97.61%、85.40%升至 99.98%、95.56%；继续增大液固体积质量比至 10/1 时，锌、锗浸出率降至 98.37%、94.45%。这是因为液固体积质量比过低会使反应矿浆密度增大，限制溶解反应的传质过程；而适当增大液固体积质量比可改善传质过程，减少反应进行的动力学限制，促进浸出反应的进行[27]。因此，确定最佳液固体积质量比为 8/1。

### 2.2.7　搅拌速度对锌、锗浸出率的影响

在硫酸初始质量浓度 160 g/L、浸出温度 160 ℃、浸出时间 150 min、液固体积质量比 8/1、氧分压 1.2 MPa、木质素 1 g 条件下，研究搅拌速度对锌、锗浸出率的影响，结果如图 10 所示。

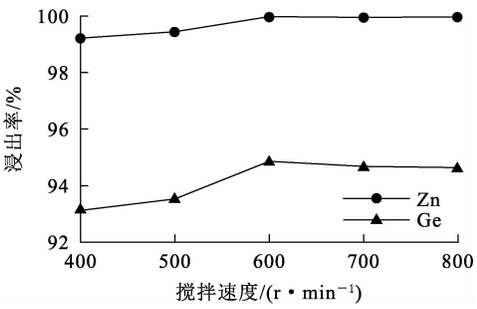



**图 10　不同搅拌速度下的锌、锗浸出率**

**Fig. 10　Leaching rate of zinc and germanium under different stirring speeds**

由图 10 可知，与其他因素相比，搅拌速度对锌、锗浸出率的影响并不明显：搅拌速度从 400 r/min增至 600 r/min 时，锌、锗浸出率分别由99.22%、93.12%升至 99.98%、94.86%；搅拌速度继续增至 800 r/min 后，锌、锗浸出率没有明

显变化。这是因为在特定搅拌速度范围内增大搅拌速度可促进原料中 $S^{2-}$ 向单质 S 转化，进而增强有价金属的浸出过程，促进其高效浸出[28]；而当搅拌速度达到 600 r/min 时，锌、锗浸出率均达到较高水平，之后趋于稳定，表明此时可能已达到传质和反应的最佳状态，继续增大搅拌速度对浸出效果优化影响不明显。综合考虑，确定最佳搅拌速度为 600 r/min。

## 3 结论

针对富锗锌精矿，研究了采用氧压酸浸工艺浸出锌、锗，主要结论如下：

1)SEM-EDS 分析显示，富锗锌精矿原料以 ZnS 为主，含 Ca、Si 等杂质元素，锗因含量低未检出微观分布特征。

2)氧压酸浸最佳工艺参数为：温度 160 ℃、时间 150 min、初始酸度 160 g/L、氧压 1.2 MPa、木质素磺酸钠添加量 1 g、液固体积质量比 8/1、搅拌速度600 r/min。在该条件下，锌、锗浸出率分别达99.98%与94.86%。

3)该工艺与常压酸浸相比，能大幅提升锗浸出率，并显著缩短浸出时间，与现有生产方法相比，也能进一步优化锗回收效率，同时避免 $H_2S$ 生成造成污染，在实现锌、锗高效浸出的同时兼具环保与经济效益，符合绿色冶金发展要求。

该工艺虽实现了锌、锗的高效提取，但未对浸出过程中杂质影响、分离效率等问题进行深入研究。下一步有必要深入探究 $Fe^{3+}$、$Al^{3+}$、$Cu^{2+}$ 等杂质离子在浸出过程中的迁移行为及其对锗锌分离效率的影响机制，并系统考察 S、Fe、Si 等伴生元素在浸出过程中的走向及其对锌、锗浸出行为的规律性影响。

**参考文献：**


[1] 熊浩，普世坤，邵雨萌，等. 从含锗烟尘中富集提取锗的工艺研究[J]. 稀有金属与硬质合金，2023，51(5)：22-27.
XIONG Hao，PU Shikun，SHAO Yumeng，et al. Study on the erichment and etraction pocess of germanium from germanium-containing dust[J]. Rare Metals and Cemented Carbides，2023，51(5)：22-27.

[2] 唐鸿鹄，刘丙建，王翠，等. 煤及其副产物中锗的提取利用研究进展[J]. 有色金属(冶炼部分)，2023(8)：60-71.
TANG Honghu，LIU Bingjian，WANG Cui，et al. Review on extraction and utilization of germanium in coal and its by-products[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2023(8)：60-71.

[3] 刘殿传，李华楷，兰国辉. 含锗资源湿法处理的研究进展[J]. 云南冶金，2023，52(3)：86-90.
LIU Dianchuan，LI Huakai，LAN Guohui. Research progress on wet treatment of germanium-bearing resources[J]. Yunnan Metallurgy，2023，52(3)：86-90.

[4] JIANG T，ZHANG T，LIU Z H. Review on resources and recycling of germanium，with special focus on characteristics，mechanism and challenges of solvent extraction[J]. Journal of Cleaner Production，2021，294. DOI：10.1016/j.jclepro.2021.126217.

[5] 邓志敢，朱应旭，魏昶，等. 常压富氧浸出含锗氧化锌烟尘回收锌和锗[J]. 矿冶，2020，29(1)：37-43.
DENG Zhigan，ZHU Yingxu，WEI Chang，et al. Recovery of zinc and germanium from zinc oxide dust containing germanium by atmospheric oxygen enrichment leaching[J]. Mining and Metallurgy，2020，29(1)：37-43.

[6] 邵庆阳，吴远桂，谈定生，等. 用稀硫酸-有机酸体系浸出锌粉置换渣中的锗试验研究[J]. 湿法冶金，2023，42(3)：241-246.
SHAO Qingyang，WU Yuangui，TAN Dingsheng，et al. Leaching of germanium from zinc refinery residues in the dilute sulfuric acid-organic acid system[J]. Hydrometallurgy of China，2023，42(3)：241-246.

[7] LIU F P，LIU Z H，LI Y H，et al. Extraction of gallium and germanium from zinc refinery residues by pressure acid leaching[J]. Hydrometallurgy，2016，164：313-320.

[8] XIN C F，XIA H Y，ZHANG Q，et al. Leaching of zinc and germanium from zinc oxide dust in sulfuric acid-ozone media[J]. Arabian Journal of Chemistry，2021，14(12). DOI：10.1016/j.arabjc.2021.103450.

[9] 雷华志，崔丁方，李雨耕，等. 国内外锗回收研究进展[J]. 云南冶金，2023，52(增刊 1)：194-198.
LEI Huazhi，CUI Dingfang，LI Yugeng，et al. Research progress on germanium recovery in China and abroad[J]. Yunnan Metallurgy，2023，52(Sup. 1)：194-198.

[10] 韦乾坤，韦国旺，陈俊，等. 从锌锗浸出液中提取锗的研究进展[J]. 世界有色金属，2024(14)：172-174.
WEI Qiankun，WEI Guowang，CHEN Jun，et al. Research progress on extraction of germanium from zinc and germanium leaching solution[J]. World Nonferrous Metals，2024(14)：172-174.

[11] RAO S，LIU Z Q，WANG D X，et al. Hydrometallurgical process for recovery of Zn，Pb，Ga and Ge from Zn refinery residues[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China，2021，31(2)：555-564.

[12] WANG W K，WANG F C，LU F H. Microwave alkaline roasting-water dissolving process for germanium extraction from zinc oxide dust and its analysis by response surface methodology(RSM)[J]. Metallurgical Research & Technology，2018，115(2). DOI：10.1051/METAL/2017093.

[13] RAO S，WANG D X，LIU Z Q，et al. Selective extraction of zinc，gallium，and germanium from zinc refinery residue using two stage acid and alkaline leaching[J]. Hydrometallurgy，2019，183：38-44.

[14] 李存兄，顾智辉，李倡纹，等. 湿法炼锌溶液中锗的富集与回收研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2023，48(2)：1-9.
LI Cunxiong，GU Zhihui，LI Changwen，et al. Research progress on enrichment and recovery of germanium from zinc hydrometallurgical Solution[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)，2023，48(2)：1-9.

[15] 陈欢，刘志宏，刘付朋，等. 用 N235 从低浓度硫酸溶液中萃取锗试验研究[J]. 湿法冶金，2017，36(5)：391-396.
CHEN Huan，LIU Zhihong，LIU Fupeng，et al. Solvent extraction of germanium from low concentration sulfuric acid solution using N235[J]. Hydrometallurgy of China，2017，36(5)：391-396.

[16] 周子豪，周东风，李兴彬，等. 锌精矿氧压浸出液沉铜协同除氯砷行为及机理[J]. 中国有色金属学报，2025，35(4)：1369-1380.
ZHOU Zihao，ZHOU Dongfeng，LI Xingbin，et al. Behavior and mechanism of synergistic arsenic and chlorine removal by copper precipitation from oxygen pressure leaching solution of zinc concentrate[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2025，35(4)：1369-1380.

[17] 赵红梅，张候文，李衍林. 氧化锌烟尘高效提锗技术研究及应用[J]. 世界有色金属，2024(6)：1-4.
ZHAO Hongmei，ZHANG Houwen，LI Yanlin. Research and application of efficient germanium extraction technology from zinc oxide dust[J]. World Nonferrous Metals，2024(6)：1-4.

[18] 廖为新，王吉坤，梁铎强. 富锗硫化锌精矿的氧压酸浸研究[J]. 黄金，2008，29(3)：39-42.
LIAO Weixin，WANG Jikun，LIANG Duoqiang. Pressure oxidative leaching of germanium-rich zinc sulphide concentrate[J]. Gold，2008，29(3)：39-42.

[19] 吉文斌，李存兄，林晓坦，等. 高锗锌精矿锌锗深度浸出及铁同步沉淀行为[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版)，2022，47(2)：1-11.
JI Wenbin，LI Cunxiong，LIN Xiaotan，et al. Deep leaching of zinc and germanium from high germanium zinc concentrate and simultaneous precipitation of iron[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology(Natural Science)，2022，47(2)：1-11.

[20] 廖银英，王大骞，刘鑫宇，等. 锌精矿氧压浸出条件优化及有价元素迁移规律研究[J]. 金属矿山，2025(2)：106-111.
LIAO Yinying，WANG Daqian，LIU Xinyu，et al. Study on optimization of oxygen pressure leaching conditions for zinc concentrate and migration rules of valuable elements[J]. Metal Mine，2025(2)：106-111.

[21] 邓学文. 氧压酸浸法从富锗湿法炼锌渣中浸出锌和锗[J]. 世界有色金属，2022，47(14)：22-25.
DENG Xuewen. Recovery of Zn and Ge from Ge-rich zinc metallurgy residue by oxygen pressure acid leaching[J]. World Nonferrous Metals，2022，47(14)：22-25.

[22] 陆占清，邓志敢，魏昶，等. 氧化锌烟尘中锗的浸出行为[J]. 中国有色金属学报，2024，34(3)：934-946.
LU Zhanqing，DENG Zhigan，WEI Chang，et al. Leaching performance of germanium in zinc oxide dust[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals，2024，34(3)：934-946.

[23] 付光，韦洁，陆占清，等. 超声协同氧化剂浸出高硅低锗氧化锌烟尘研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2025(2)：116-124.
FU Guang，WEI Jie，LU Zhanqing，et al. Study on leaching of zinc oxide dust with high silicon and low germanium by ultrasonic coordination with oxidant[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2025(2)：116-124.

[24] 徐毅. 硫化锌精矿中镓锗在高压氧浸中的浸出行为研究[J]. 湖南工业大学学报，2011，25(4)：1-4.
XU Yi. Leaching behaviors of gallium and germanium in zinc sulfide concentrate during high oxygen pressure leach process[J]. Journal of Hunan University of Technology，2011，25(4)：1-4.

[25] 刘付朋，马帅兵. 黄铁矿为主要含铁矿物硫化锌精矿氧压浸出中镓锗行为研究[J]. 江西冶金，2020，40(4)：10-18.
LIU Fupeng，MA Shuaibing. Behaviors of gallium and germanium in oxygen pressure leaching of zinc sulfide concentrate with pyrite as main iron-bearing mineral[J]. Jiangxi Metallurgy，2020，40(4)：10-18.

[26] JIANG T，JIAO G H，WANG P C，et al. Lignosulphonates in zinc pressure leaching：decomposition behaviour and effect of lignosulphonates' characteristics on leaching performance[J]. Journal of Cleaner Production，2024，435. DOI：10.1016/j.jclepro.2023.140355.

[27] 刘强，李存兄，王国栋，等. 含锗银精矿浓硫酸熟化—氧压酸浸行为研究[J]. 有色金属(冶炼部分)，2024(10)：81-90.
LIU Qiang，LI Cunxiong，WANG Guodong，et al. Study on behavior of germanium-containing silver concentrates by concentrated sulphuric acid curing and oxygen pressure acid leaching[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)，2024(10)：81-90.

[28] GENG X L，WU C G，QU W，et al. Major obstacles hindering gallium and germanium leaching in the zinc refining process[J]. Chemical Engineering Science，2025，302. DOI：10.1016/j.ces.2024.120793.

# Synergistic Leaching of Zinc and Germanium from Germanium-rich Zinc Concentrate

FENG Zhichao[1], PANG Peiyan[2], JIANG Xuexian[2], HE Guixiang[2],
ZHOU Jierong[2], LI Zhonglin[1], LI Yibing[1]

(1. *College of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin* 541004, *China*;
2. *College of Metallurgical and Resources Engineering, Guilin University of Technology at Nanning, Nanning* 530001, *China*)

**Abstract**: The leaching of zinc and germanium from germanium-rich zinc concentrate by oxygen pressure leaching process was studied. The effects of key factors such as the initial acidity of sulfuric acid, reaction temperature, leaching time, oxygen partial pressure, sodium lignosulfonate addition amount, liquid volume to solid mass ratio, and stirring speed on the leaching rates of zinc and germanium were systematically investigated. The optimal process conditions for oxygen pressure leaching are determined through single-factor experiments as follows: leaching temperature is 160 ℃, leaching time is 150 min, initial acidity of sulfuric acid is 160 g/L, partial pressure of oxygen is 1.2 MPa, addition amount of sodium lignosulfonate is 1 g, liquid volume to solid mass ratio is 8/1, and stirring speed is 600 r/min. Under the conditions, the germanium leaching rate reaches 94.86% and the zinc leaching rate reaches 99.98%. Compared with the traditional atmospheric pressure leaching, the optimized oxygen pressure process can increase the germanium leaching rate by more than 15%, shorten the leaching time by 40%, and also avoid the emission of high-concentration $H_2S$ gas, reducing environmental pollution and providing a technical reference for the comprehensive utilization of valuable elements in zinc concentrate.

**Key words**: germanium-rich zinc concentrate; oxygen pressure leaching; zinc; germanium; sulfuric acid