



难处理金矿预氧化过程中载金包裹体的相变与重构研究进展

吴甜甜, 沈智慧, 王建龙, 何桂旭, 邱跃琴

(贵州大学矿业学院, 喀斯特地区优势矿产资源高效利用国家地方联合工程实验室, 贵州省非金属矿产资源综合利用重点实验室, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。在“双碳”和难处理金矿资源“压舱石”背景下, 预氧化是难处理金矿高效提金的有效预处理方法。有效破坏微细浸染金包裹体, 消除或避免有害物质对金的钝化、劫金或二次包裹作用, 是决定难处理金矿中金回收率高低的关键和瓶颈问题。明晰预氧化过程中载金物质的相变重构演化规律, 对定向破坏载金包裹体和高效浸金至关重要。本文概述了难处理金矿的典型特征与现有预氧化技术, 总结了焙烧氧化、热压氧化、生物氧化、化学氧化及其他预氧化过程中载金包裹体的相变重构研究进展。结果表明, 载金硫化物通过预氧化主要转变为铁(砷)氧化物和硫(砷)酸盐, 受氧化温度、气氛或含氧量、酸碱环境、氧化还原电位、菌种特性等多因素耦合作用, 也可能转变为单质硫、氧化硫、硫代硫酸盐、黄钾铁矾和臭葱石等次生产物, 黄钾铁矾、氧化铁和硫酸钙等是导致金二次包裹的主要固相物质。低温低压中性热压氧化, 高效嗜热嗜碱耐砷菌种驯化、多因素耦合下的细菌氧化过程强化, 绿色高效氧化剂筛选、基于多场耦合的化学氧化等预氧化工艺开发与微观机制仍需系统深入研究。矿石特性、预氧化过程反应、载金物质相变重构与金回收率之间的耦合关系及调控是未来难处理金矿绿色高效预氧化领域的研究热点与难点。

关键词: 矿业工程; 难处理金矿; 预氧化; 载金包裹体; 物相转变; 物相重构

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.013

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532(2024)05-0085-10

引用格式: 吴甜甜, 沈智慧, 王建龙, 等. 难处理金矿预氧化过程中载金包裹体的相变与重构研究进展[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 85-94.

WU Tiantian, SHEN Zhihui, WANG Jianlong, et al. Recent advances for phase transformation and reconstruction of gold-bearing inclusions during the pre-oxidation of refractory gold ores[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 85-94.

黄金因金融储备、货币功能成为我国重要紧缺的战略性矿产资源^[1]。截止2021年, 我国金产量连续5年下降, 但仍连续15年位居世界第一, 截止2020年底, 我国金矿资源量超1.47万t, 金矿储量(金属量)约为1 927 t^[2]。据报道, 全球矿山生产金占金总供给的70%以上, 表明矿产金仍是金的主要来源^[3]。

金在自然界中多以自然金、金-银固溶体矿物、金的碲化物等形式存在, 金具有典型的亲硫性, 导致其常与黄铁矿、毒砂等硫化物共生^[4]。脉石矿物对微细金的包裹特性、有害元素在提金过程中的竞争、抑制或劫金特性等导致金难以有效提取, 成为难处理金矿。随着易选金矿资源的消耗枯竭, 难处理金矿的开发利用是满足当前我国

收稿日期: 2022-08-24

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2021]一般256); 大学生创新创业训练计划项目(贵大(国)创字2021(019))

作者简介: 吴甜甜(1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向为难选矿石的选矿及资源综合利用。

通信作者: 沈智慧(1990-), 女, 博士, 高级实验师, 主要从事难选矿石的选矿及资源综合利用。

黄金需求增长和黄金资源安全保障的必由之路。在“双碳”背景下，如何实现难处理金矿中金的绿色、高效、低成本回收已成为黄金冶炼行业亟需解决的重大问题。

预氧化是难处理金矿高效提金的主流手段和有效方法，预氧化过程中载金物质的相变和重构直接影响后续金浸出效果，且受化学反应、热力学、氧化还原媒介、矿物组分等预氧化过程因素的影响^[5]。明晰预氧化过程中载金物相的演化规律，探究相变重构与金赋存传递和迁移行为的耦合关系是目前难处理金矿预氧化微观机制研究、高效预氧化工艺开发的热点和难点。本文综述了目前国内外关于难处理金矿在不同预氧化工艺过程中的物相转变与重构研究现状，分析总结了各种预氧化方法对相变重构的作用机理，并探讨了难处理金矿预氧化领域未来的研究方向。

1 难处理金矿提金的瓶颈问题

目前，难处理金矿资源占全球金矿储量的

60%~70%，全球金总产量中约 1/3 的金产自难处理金矿^[6]。普遍认为，细磨后直接采用常规氰化浸出时，金浸出率小于 80% 的称为难处理金矿，其中金浸出率小于 50% 的为极难处理矿石^[7]。从矿石选冶难度维度，可将难处理金矿分为易选难冶型矿石和难选难冶型矿石^[8]。易选难冶型矿石中金主要赋存在硫化物中，通过浮选容易富集载金硫化物，但其中金属元素及有机碳、砷等物质会消耗大量药剂，导致金浸出效果差，难选难冶型矿石性质则更为复杂^[9]。从金赋存状态维度，可将难处理金矿大致分为微细浸染型金矿、复杂性共生金矿、碳质金矿和碲化矿^[10]。四种金矿类型的难处理原因及瓶颈问题见表 1。

针对难处理金矿中金难以直接浸出和回收的问题，广大研究者们开发出了多种预氧化技术，通过预氧化-浸出可大幅提高难处理金矿中金回收率。预氧化工艺开发及其机制研究一直是难处理金矿湿法提金领域的研究热点和攻关难点。

表 1 四种金矿难处理原因及瓶颈问题^[11-14]
Table 1 Four types of gold mining difficult to process reasons and bottlenecks

金矿类型	难处理原因	瓶颈问题
微细浸染型金矿	金以显微、次显微甚至晶格金形态浸染包裹于脉石矿物，通过磨矿难以使金暴露出来与浸出剂接触反应	在适中的磨矿成本下，微细金的快速暴露及与浸出剂的有效触、绿色高效预处理及浸出剂的开发
复杂性共生金矿	金矿中S、As、Fe、Sb等有害元素含量高，浸出过程会消耗大量氧、碱和浸出剂且容易形成的铁氧化物、砷和碲化合物造成金二次包裹	有害元素的高效去除、金二次包裹的有效避免
碳质金矿	矿石中存在高活性的无定型有机碳、石墨等碳质物和黏土矿物，具有较强“劫金”特性	消除碳质物质及粘土矿物等具有“劫金”特性的矿物
碲化矿	金以不溶性合金或碲化金等化合物形式存在；金与碲、铋、锑等导电矿物发生阳极溶解钝化	溶解不溶性合金或碲化金的药剂及工艺开发、快速消除金与导电矿物钝化

2 难处理金矿的预氧化技术

针对难处理金矿，目前常见的预氧化技术有焙烧氧化、热压氧化、化学氧化、生物氧化及其他氧化技术。焙烧氧化是在高温下使矿石氧化分解，得到疏松多孔的焙砂，主要包括常规、闪速、固化和微波焙烧等^[15]。热压氧化是在高温、高压、富氧条件下，在反应釜中加入酸或碱分解载金包裹体，主要分为酸性热压氧化和碱性热压氧化^[16]。生物氧化是在有氧条件下利用微生物直接或间接氧化作用，将载金硫化物包裹层分解，应用较多的微生物主要包括氧化硫硫杆菌、氧化亚铁硫杆菌、铁氧化钩端螺菌、硫化芽孢杆菌属、高温嗜酸古细菌和微螺球菌等^[17]。化学氧化是在常压下利用氧化剂对金矿石进行预氧化处

理，主要包括硝酸氧化法、电化学氧化法和碱浸氧化法^[18]。四种常见预氧化技术适用的金矿类型及优缺点见表 2。此外，还有超细磨、机械活化、超声空化等预氧化工艺。

近年来，针对难处理金矿，高效预氧化工艺开发及优化调控是目前预氧化领域的主要研究内容。此外，预氧化对金矿中载金物质的影响规律、基于载金包裹体相变重构的预氧化过程调控及金的迁移行为研究已经受到研究者们广泛关注。

3 难处理金矿的物相转变与重构

3.1 焙烧氧化过程的相变重构

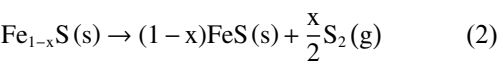
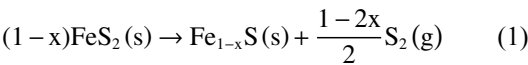
3.1.1 载金硫化物

众多文献报道，焙烧温度、时间、气氛、助

表 2 预氧化技术适用金矿类型及优缺点^[15-18]
Table 2 Applicable gold ore types and advantages and disadvantages of pre-oxidation technology

预氧化技术	适用金矿类型	优点	缺点
焙烧氧化	复杂性共生金矿碳质金矿	工艺成熟、操作简单、对原料适应性强	易过烧导致二次包裹，产生As ₂ O ₃ 和SO ₂ 等有毒气体
热压氧化	高硫高砷微细浸染型金矿	反应速度快、预氧化效率高	设备要求高，废料难以综合回收
生物氧化	高硫高砷低品位难选金矿	环境污染小、设备投资少、流程简单、操作方便	氧化效率低、环境苛刻
化学氧化	高硫高砷微细浸染型金矿复杂性共生金矿	操作方便、适应性强、反应速度快、周期短	试剂对矿种、工艺条件变化敏感，设备要求高，成本较高

剂等氧化条件会影响硫化型金矿的物相转变和重构过程，尤其对主要载金矿物黄铁矿和毒砂的影响较大。Qin 等^[19]提出了一种从硫化难选金矿中回收金的工艺。在空气焙烧过程中，主要载金矿物毒砂和黄铁矿会转变为氧化铁、氧化砷、氧化硫、硫酸盐和砷酸盐，其中砷在空气中受热易氧化成 As₂O₃ 或 As₂O₅。通过空气焙烧氧化，金的总回收率从 42.27% 提高到 98.06%。Wu 等^[20]研究发现，黄铁矿在碱性环境及氧气气氛中被氧化成氢氧化铁和硫代硫酸铁，氢氧化铁在氢氧根介质和高温下形成针铁矿（FeOOH），最终转化为赤铁矿（Fe₂O₃），赤铁矿在黄铁矿颗粒表面形成的钝化膜阻碍其进一步氧化，但加入 Na₂CO₃ 后，钝化膜转变为可溶性碳酸铁配合物（FeHCO₃⁺，FeCO₃，Fe(CO₃)₂⁻，Fe(OH)⁻，Fe(CO₃)₂⁻），金提取率由 80% 增至 91.56%。Prasad 等^[21]通过热力学分析和实验研究发现，控制氧添加量可以改变物相，控制 FeS₂ 与 O₂ 的比例为 0.25:1 且焙烧温度超过 500 °C 时，FeS₂ 向 Fe₂O₃ 和 SO₂ 转变。在相同焙烧温度和氧添加量下，随着 FeS₂ 加入量的增加，FeS₂ 向 Fe₃O₄、Fe_{0.877}S 和 SO₂ 转变比例增大。赵留成等^[22]指出，空气气氛下黄铁矿被氧化成赤铁矿、磁铁矿、硫酸盐和二氧化硫；CO₂ 气氛下，黄铁矿分解成磁黄铁矿、S、SO₂、CO 和 COS；N₂ 气氛下的相变途径为黄铁矿→磁黄铁矿→硫化亚铁，相变反应见式（1）、（2）。



Zhang 等^[23]研究发现，黄铁矿在真空焙烧过程中不断脱硫，相变过程遵循黄铁矿→单斜六方磁黄铁矿→六方磁黄铁矿→硫化亚铁，载金黄铁矿中金解离过程，真空焙烧后黄铁矿包裹金的解离度达到 72.37%。Port 等^[24]指出，黄铁矿在 500 ~

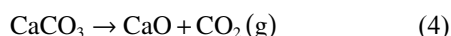
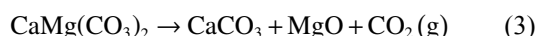
600 °C 的真空环境中开始失去硫原子生成磁黄铁矿，600 ~ 700 °C 时结束相变，700 °C 以上没有形成新相，黄铁矿在 700 °C 上真空焙烧后，只存在六方磁黄铁矿；温度从 700 °C 升至 1 100 °C 时，磁黄铁矿衍射峰未发生明显偏移，说明六方磁黄铁矿在无氧气氛的高温下稳定存在。温度介于 1 100 ~ 1 200 °C 的真空中，磁黄铁矿开始熔化并重结晶，形成磁黄铁矿的变体硫化亚铁（FeS）。部分学者针对含有黄铁矿的金矿石进行预氧化研究，发现在惰性气氛下加热后，金矿石中的黄铁矿转化为硫化铁和单体硫^[25]。Zhang 等^[26]研究了惰性气氛下金精矿微波氧化预处理过程中硫化物的物相转变，结果表明，黄铁矿（FeS₂）在惰性气氛中微波加热后分解为单质硫和多孔磁黄铁矿（Fe_{1-x}S），利用微波预处理生成的元素硫对金进行碱性硫化物浸出，金提取率可达 91.98%。

3.1.2 载金氧化物、碳酸盐及硅酸盐矿物

在载金氧化物中，赤铁矿和石英在焙烧氧化中的相变过程受到了广泛关注。研究发现，焙烧氧化过程中赤铁矿的相变是一个复杂多级反应过程，Fe 物相遵循 Fe₂O₃→Fe₃O₄→FeO 的转变规律，针对不同温度下赤铁矿的焙烧研究表明，赤铁矿向磁铁矿转变的比例随焙烧温度升高而增加，650 °C 时赤铁矿会迅速转变为磁铁矿，转化率最高可达 92.75%^[27]。贾玉娟^[28]研究认为，在碱性环境中焙烧预处理后，赤铁矿和石英会分别转化为铁硅酸钠（Na_{0.9}(Fe_{0.9}Si_{0.1})O₂）和硅酸钠（Na₂SiO₃）。

白云石、方解石和高岭石等分别是典型的载金碳酸盐和硅酸盐类矿物。诸多文献报道称，碳酸盐、硅酸盐相变过程受温度梯度影响显著。Aza 等^[29]认为，金矿中的白云石在 690 °C 时被分解为 CaO 和 MgO，在 886 °C 时白云石和方解石转变为 MgO、CaO 和 CO₂。Zhang 等^[30]采用还原焙烧预处理碳质金矿，金浸出率由 2.43% 提高到

73.7%，研究发现载金矿物白云石的分解通常分为两个阶段，见反应式（3）～（4）。



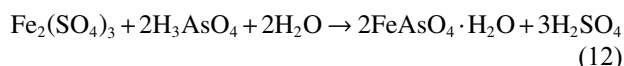
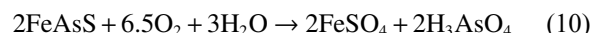
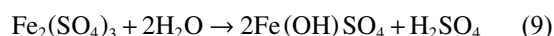
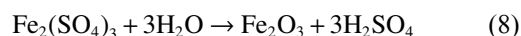
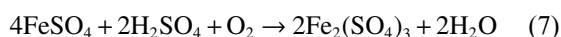
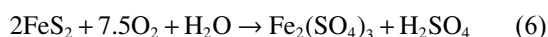
文献研究表明，空气环境中焙烧温度为 500 ℃ 时，高岭石发生脱羟基反应分解成偏高岭石，绢云母开始消失，赤铁矿开始生成；焙烧温度高于 600 ℃ 时，黄铁矿被完全氧化成赤铁矿^[31]。空气环境中焙烧温度介于 400～650 ℃ 时，碳质物转变为 CO_2 ，盐类矿物逐渐分解为氧化物，矿石中逐渐产生孔隙结构；温度大于 650 ℃ 时，碳质物完全氧化，盐类矿物完全分解，孔隙结构明显增多，此时浸出剂容易通过孔隙与金接触反应，金浸出率最高；但过度焙烧时（850 ℃）会形成 CaSO_4 、 CaSiO_3 和 CaFe_2O_4 等新相，导致金的二次包裹，金浸出率显著降低^[32]。

以上研究表明，在焙烧氧化过程中，载金硫化物（主要为黄铁矿和毒砂）大多被氧化为铁氧化物、砷氧化物、硫酸盐和砷酸盐，其中 S 元素也可转变为单质硫、氧化硫和硫代硫酸盐。载金硫化物的物相转变与重构过程受焙烧温度、辅助药剂及焙烧气氛等因素影响显著，焙烧温度、焙烧时间和矿物组分间交互反应等对氧化物、碳酸盐及硅酸盐等载金矿物的物相转变影响较大。因此焙烧温度、气氛条件、含氧量、焙砂酸碱环境、助剂用量等焙烧氧化条件的影响和精准调控，以及高温下矿物组分间化学反应对载金物相和矿石结构变化、金二次包裹的影响及调控是载金矿物定向转变和重构的研究重点与难点。

3.2 热压氧化过程的相关变重构

3.2.1 酸性热压氧化

酸性热压氧化主要用于处理含硫含砷的酸性或弱碱性金矿石。大部分黄铁矿和毒砂经酸性热压氧化后转变为亚硫酸铁、硫酸铁、水合砷酸铁等物相，主要的化学反应式为^[33]：

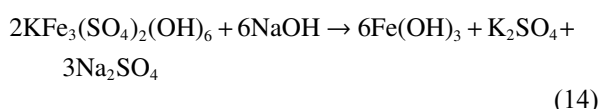
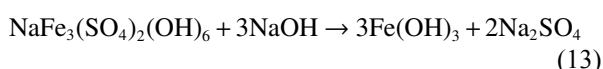


Zhang 等^[34]研究了热压氧化过程中黄铁矿和毒砂的物相变化过程，表明在完全氧化时黄铁矿被氧化为硫酸亚铁和硫酸，毒砂被氧化为亚砷酸，硫酸亚铁和亚砷酸继续被氧化为硫酸铁和砷酸盐，在不完全氧化过程中会产生不利于金浸出的单质硫，继续将中间单质硫转化为硫酸或硫酸铁后，硫氧化率和碳酸盐分解率可达 98%。张文波^[35]指出，在酸性介质和高温下，硫、铁、砷化物发生氧化反应，大部分硫化物转变为硫酸盐，反应过程产生的 Fe^{2+} 被氧化为 Fe^{3+} 之后继续沉淀为赤铁矿等副产品，砷被氧化为砷酸盐。庄容传等^[36]研究指出，高硫高砷金精矿在热压氧化过程中会形成不利于后续浸出的亚稳态碱式硫酸盐和砷酸盐，将金精矿酸化后加入 CuSO_4 进行热压氧化，可抑制亚稳态碱式硫（砷）酸盐的生成，并能将砷转化为稳定形态，热压氧化后金浸出率最高可达 95.30%。Ng 等^[37]开展了含砷难处理金矿石的酸压氧化固砷研究，发现当矿石中 $\text{Fe}:\text{As}$ 为 1:1 和 2:1 时，氧化后主要含砷相为碱性硫酸亚砷酸铁（ $\text{Fe}(\text{AsO}_4)_{1-x}(\text{SO}_4)_x(\text{O-H})_x(1-x)\text{H}_2\text{O}$ ），当 $\text{Fe}:\text{As}$ 大于 2:1 且固化温度为 60 ℃ 时，含水硫酸铁消失，但当 $\text{Fe}:\text{As}$ 增至 10:1 时，主要含砷相为无定形砷酸铁，表明在较低的铁砷比条件下砷才能形成稳定沉淀实现固化。

3.2.2 碱性热压氧化

徐忠敏等^[38]采用化学氧化法处理复杂难处理金精矿时金银回收率仅为 13%～56%，通过碱性热压氧化可获得 97.15% 的金回收率。研究表明，在碱性热压氧化时间为 2 h 时，黄铁矿主要被氧化为硫酸亚铁，硫氧化率较低，当时间达到 6 h 时，硫氧化率增大，但溶液中部分硫酸铁会发生水解反应生成碱式硫酸铁、赤铁矿或黄钾铁矾等沉淀进入渣中，导致渣中硫酸盐含量增加。Xu 等^[39]指出，碱性热压氧化后，金矿石中大部分毒砂和黄铁矿转变为赤铁矿，硫元素转化为硫代硫酸盐，硫代硫酸盐分解产生硫酸钙，石英在浸出过程中

可与氢氧化钙反应形成硅酸钙。Zhang 等^[40]发现, 卡林型金精矿酸压氧化过程形成的黄钾铁矾和硫酸钙会导致已暴露金的二次包裹, 但在高温强碱加压体系中, 硫酸钙会转变为微溶氢氧化钙, 黄钾铁矾会转变为氢氧化铁 (方程式 13~14), 氢氧化铁的析出可以加速黄钾铁矾的分解, 打开金的二次包裹体, 通过酸压-碱压氧化后金浸出率比酸压氧化高 8.4%。



受矿石钝化和不完全氧化等影响, 碱性热压氧化的金回收率普遍低于酸性热压氧化。诸多文献研究表明, 以黄铁矿、毒砂、斜方砷铁矿为代表的高硫、高砷载金矿物在酸压、碱压氧化预处理过程中, 硫、铁主要经硫酸亚铁、硫酸铁最终转变为氧化铁和硫酸钙, 砷主要经亚砷酸转变为水合砷酸铁等砷酸盐。载金物质的相变重构受温度、氧分压、矿浆电位、pH 值和动力学过程影响较大, 且氧化铁、硫酸钙、黄钾铁矾等次生产物的附着沉积及对金的二次包裹会导致金的损失。因此, 低温、低压、中性环境的高效氧化工艺、载金相变重构的精确控制及金二次包裹的有效避免仍是热压氧化预处理工艺开发和机理研究的主要挑战。

3.3 生物氧化过程的相变重构

生物氧化通常是通过微生物分泌产生生物酶来促进载金矿物的氧化。Zhang 等^[41]研究表明, 经柱式生物氧化后, 黄铁矿和毒砂转变为相应硫酸盐、砷酸盐、单质硫和二价铁离子, 生物氧化渣的全泥氰化率为 (81±2)%, 金回收率比未处理金精矿提高 (44±1)%。Wu 等^[42]研究了含金黄铁矿碳糊电极在生物浸出中的电化学行为, 通过 EDS 和 XPS 分析证实了生物氧化促使黄铁矿转变为单质硫和硫酸盐。李骞等^[43]研究指出, 氧化亚铁硫杆菌可以将 $\text{FeSO}_4\text{-K}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 体系中的 Fe^{2+} 氧化为 Fe^{3+} , Fe^{3+} 在高浓度 SO_4^{2-} 、 K^+ 存在和酸性条件下水解生成黄钾铁矾。砷黄铁矿在生物浸出时会产生雄黄、雌黄、元素硫和黄钾铁矾等钝化物, 添加 Cu^{2+} 和 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$, 利用 Cu^{2+} 和 $\text{C}_2\text{O}_4^{2-}$ 协同强化生物

氧化过程, Cu^{2+} 与雌黄、雄黄反应产生硫化铜和砷酸, S 被氧化为硫酸, 草酸根与三价铁离子配合, 减少黄钾铁矾的生成。Mubarak 等^[44]认为, 混合营养菌和化能养菌预氧化过程中, 微生物先与黄铁矿、磁黄铁矿、毒砂和黄铜矿等硫化物发生物理接触, 再与溶解氧反应, 将硫化物中硫转化为硫酸盐、单质硫、硫代硫酸盐/类硫代硫酸盐和黄钾铁矾。通过生物氧化后, 高硫金精矿的金提取率最高为 91.40%, 比直接氰化率高 18%。邢志军等^[45]指出, 生物氧化使硫化物分解为铁、砷、硫酸盐等氧化产物, 金得以充分暴露解离, 金浸出率为 94.27%。Konadu 等^[46]总结叙述, 铁氧化古菌氧化后, 硫化物转变为 FeSO_4 、 FeOOH 和单质硫, 经含有木质素降解酶的白腐菌氧化后, 含碳物质和硅酸盐等转变为碳化铝硅酸盐和 CO_2 , 碱性洗涤可去除酶降解产物和生物分子, 使金暴露, 金回收率提高。

针对含砷矿物的微生物氧化, 由于氧化过程产生的 As^{3+} 和 As^{5+} 对细菌生长具有明显抑制性, 且产生的单质硫、黄钾铁矾、砷酸铁和臭葱石等中间及次生产物会阻碍细菌与矿物作用, 因此众多学者也积极开展了微生物氧化的过程强化研究, 分析了强化过程载金物质的相变重构过程。Deng 等^[47]研究了几种 Fe^{3+} 化合物的强化作用, 发现 Fe^{3+} 作用后, 毒砂表面腐蚀程度增加, 单质硫、硫代硫酸盐和雌黄等中间产物显著减少, 黄钾铁矾增加, 表明 Fe^{3+} 能提高硫和铁的氧化活性, 加速中间产物转化。Zhang 等^[48]研究表明, 添加腐殖酸氧化 12 h 后, 浸渣中砷黄铁矿含量由 19.3% 降至 7.1%, 矿物表面未见单质硫和砷酸铁, 且氧化后形成了絮状多孔的黄钾铁矾, 能有效吸附浸液中砷, 说明腐殖酸能改变微生物氧化过程中砷的相变, 提高浸出速率。张世鏢等^[49]发现硫化物生物氧化过程中会生成大量 Fe^{2+} 、 As^{3+} , 添加适量催化剂和氧化剂与生物氧化协同催化氧化 Fe^{2+} , Fe^{2+} 被氧化生成 Fe^{3+} , Fe^{3+} 进一步氧化 As^{2+} , 从而降低了矿浆溶液中 As^{3+} 浓度, 降低了 As^{3+} 对细菌活性的抑制作用, 提高了含砷金精矿的氧化效果。

以上研究表明, 由于不同菌种的氧化机制不同, 生物氧化过程产生的中间和次生产物也不同。S、As 经微生物氧化后主要转变为硫酸盐、砷酸盐, 也可能产生单质硫、硫代硫酸盐、黄钾铁矾和臭葱石等次生产物。生物氧化效率受菌种

特性、温度、pH 值和电位等影响较大,添加金属离子、氧化剂、表面活性剂或利用氧化体系中的原电池效应可以强化载金矿物的氧化,或减少阻碍矿物氧化溶解的中间产物,促进载金矿物中 Fe、S、As 等元素向可溶性盐类物质转变。目前大部分细菌均为嗜酸微生物,嗜热嗜碱菌种较少,且不同类型微生物的氧化机制和不同手段的过程强化机制缺乏深入系统研究。因此高效嗜热、嗜碱和耐砷性菌种的驯化、多因素耦合下的细菌氧化机制、细菌氧化过程强化方法开发与机制探索、氧化过程载金物质相变与重构的定向调控等内容仍是难处理金矿生物氧化领域的研究热点和难点。

3.4 化学氧化过程的重构

在碱性化学氧化预处理方面,Bidari 等^[50]研究发现,氧气等常规氧化剂可以在碱性介质中氧化黄铁矿,产生氢氧化铁和硫酸盐离子。Ciminelli 等^[51]认为,碱性条件下黄铁矿的氧化产物为多孔氧化铁,而中性条件下的氧化产物多为薄而密的氧化铁。黄铁矿在酸性化学氧化过程中被 Fe^{3+} 氧化为相应的盐、单质硫和亚铁离子。Bare 等^[52]指出,经过酸性化学氧化预处理,辉锑矿(Sb_2S_3)、黄铁矿(FeS_2)和毒砂(FeAsS)被盐酸氧化为相应的盐和单质,与直接氰化浸出相比,金浸出率提高 50% 以上。杨永斌等^[53]采用硫酸熟化-水浸法对高硫高砷金精矿氧化焙砂进行预处理,相较于直接氰化,金浸出率提高 20.7%。研究表明,适宜浓度的硫酸可将焙砂中赤铁矿转变为硫酸铁,进一步与硫酸反应形成板铁矾 $\text{HFe}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ 晶体,升高温度有助于赤铁矿向板铁矾的快速转变,从而提高铁脱除率。

氧化剂种类和协同作用、矿浆电位、温度、pH 值范围等因素对化学预氧化过程中载金物质的相变重构及金回收率影响较大。针对不同矿石特性的难处理金矿,筛选出合适的氧化剂至关重要,将化学氧化与电化学处理、磁脉冲强化、超声空化强化、超细磨等预处理技术相结合也是化学预氧化的发展思路。通过化学反应解析、氧化条件控制来调控载金物质的相变重构过程是降低中间及副产物对金暴露的不利影响及提高金回收率的重要研究方向。

3.5 其他氧化过程的重构

除以上四种氧化方法外,研究者们也开发了

臭氧、超声、电化学等预氧化方法。研究表明,臭氧和超声作用后,黄铁矿颗粒表面严重腐蚀,其晶体结构受到严重破坏,金包裹体能有效打开,金浸出率大幅提高。Gui 等^[54]研究发现,在超声波作用下金的浸出率由 49.12% 显著提高到 93.52%,载金矿物黄铁矿只会被氧化为 SO_4^{2-} 和 $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$,经臭氧或臭氧-超声协同预氧化后,硫化物包膜(FeS_2)能充分氧化转变为 Fe_2O_3 和 FeOOH 。Xu 等^[55]认为,金精矿的电化学氧化分为两个阶段,当电位小于 0.7 V 时,其中硫化物主要转变为氢氧化铁和元素硫、多硫化物等钝化膜,影响金精矿的进一步氧化;较高电位时(大于 0.7 V),硫化物转变为可溶性硫酸盐,使金精矿能够持续氧化,表明氧化还原电位对硫化物的物相转变影响显著。

4 结论与展望

4.1 结论

(1) 如何有效破坏微细浸染金包裹体,消除有害元素对金的钝化、劫金或二次包裹作用等技术已成为难处理金矿高效提金的瓶颈问题。针对难处理金矿,焙烧、热压、生物、化学等众多预氧化技术快速发展,预氧化过程中载金物质相变重构的演化规律与金赋存传递和迁移行为的耦合关系对定向精准破坏载金包裹体、消除有害元素和提高金回收率至关重要。

(2) 载金碳酸盐和碳质物通过焙烧氧化主要转变为相应氧化物和 CO_2 ,或与硅酸盐矿物生成含 Ca、Si 等化合物。载金硫化物通过焙烧氧化或热压氧化大多转变为铁/砷氧化物和硫/砷酸盐,其中部分 S 也会转变为单质硫、氧化硫或硫代硫酸盐,黄钾铁矾、氧化铁等固相物质是导致金二次包裹的主要次生产物。载金相变与重构受焙烧氧化温度、气氛、含氧量、酸碱环境、助剂等多因素耦合作用影响显著,受热压氧化温度、氧分压、矿浆电位、pH 值和动力学等影响较大。

(3) 载金硫化物经细菌直接或间接氧化后主要转变为硫/砷酸盐,受菌种特性、温度、pH 值和电位影响,也可能产生单质硫、硫代硫酸盐、黄钾铁矾和臭葱石等次生产物。氧化剂种类及其协同作用、矿浆电位、温度、pH 值范围是化学预氧化过程中载金物质相变重构及金回收率的主要调

控因素。

4.2 展望

(1) 目前针对难处理金矿的预氧化工艺研究较多,但低温、低压、中性热压氧化,嗜热嗜碱耐砷菌种驯化、生物氧化过程强化,绿色高效氧化剂筛选、多场耦合下化学氧化等预氧化微观机制仍需进一步深入系统研究。虽然预氧化过程中载金物质的相变演化已受到广泛研究,但更多关注的是载金硫化物的物相转变,而载金碳酸盐、硅酸盐和碳质物的物相转变研究较少。此外,针对不同性质金矿石,不同预氧化过程中载金物质的原位转变规律尚不明晰。

(2) 载金物质相变重构的定向调控、金二次包裹的有效避免及金的绿色高效回收是未来难处理金矿预氧化领域的重要研究方向和主要挑战,矿石特性、预氧化过程反应与金回收率之间的耦合关系仍是载金物相定向转变和重构的研究热点与难点。

参考文献:

- [1] 董延涛, 阴秀琦, 张艳飞, 等. 战略性矿产资源高质量开发利用问题与对策[J]. 地球学报, 2021, 42(2):145-150.
- DONG Y T, YIN X Q, ZHANG Y F, et al. Research on high quality development of strategic mineral resources industry[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2021, 42(2):145-150.
- [2] 丁全利, 胡容波. 《中国矿产资源报告(2021)》发布[N]. 中国自然资源报.
- DING Q L, HU R B. 《China's Mineral Resources Report (2021)》release[N]. China Natural Resources News.
- [3] 2020 年全球及中国黄金行业发展现状分析国内黄金产量位居全球首位[EB/OL]. (2020-09-07)[2022-08-07]. https://www.sohu.com/a/416906417_114835.
- Analysis of global and Chinese gold industry development status in 2020, domestic gold production ranks first in the world. [EB/OL]. (2020-09-07)[2022-08-07]. https://www.sohu.com/a/416906417_114835.
- [4] 梁晓, 胡瑞彪, 冯泽平. 广东某复杂难选难浸金矿工艺矿物学研究[J]. 矿产综合利用, 2019(6):65-68.
- LIANG X, HU R B, FENG Z P. Study on the technological mineralogy of a complex refractory gold ore in Guangdong[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019(6):65-68.
- [5] Zhang X, Kou J, Sun C. A comparative study of the thermal decomposition of pyrite under microwave and conventional heating with different temperatures[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2019, 138:41-53.
- [6] 张磊, 郭学益, 田庆华, 等. 难处理金矿预处理方法研究进

展及工业应用[J]. 黄金, 2021, 42(6):60-68.

ZHANG L, GUO X Y, TIAN Q H, et al. Research progress and industrial application of pretreatment methods for refractory gold ores[J]. GOLD, 2021, 42(6):60-68.

[7] 孙留根, 袁朝新, 王云, 等. 难处理金矿提金的现状及发展趋势[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(4):38-43.

SUN L G, YUAN C X, WANG Y, et al. Status and development of gold extraction from refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2015(4):38-43.

[8] 张辰敏. 工艺矿物学在难处理金矿矿物加工中的应用[J]. 中国金属通报, 2021(5):158-159.

ZHANG C M. Application of process mineralogy in refractory gold ore processing[J]. China Metal Bulletin, 2021(5):158-159.

[9] 李堪灏, 焦芬, 吴奕彤, 等. 难处理金矿预处理及金回收技术进展[J/OL]. 贵金属. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1063.TG.20220709.1242.002.html>.

LI G H, JIAO F, WU Y T, et al. Pretreatment and gold extraction status for refractory gold ore [J/OL]. Precious Metals, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1063.TG.20220709.1242.002.html>.

[10] 李骞, 董中林, 张雁, 等. 含硫砷含碳金精矿提金工艺研究[J]. 黄金, 2016, 37(11):41-45.

LI Q, DONG Z L, ZHANG Y, et al. Study on gold extraction from carbonaceous gold concentrates containing sulfur and arsenic[J]. GOLD, 2016, 37(11):41-45.

[11] 宋言. 高硫含砷难处理金矿的细菌氧化及强化浸出机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2019.

SONG Y. Study on bio-oxidation and strengthening bio-oxidation mechanism of refractory high-sulfur and arsenic-bearing gold concentrate[D]. Shenyang: Northeastern University, 2019.

[12] 赵磊. 山东某浮选金精矿氰化浸出实验研究[J]. 矿产综合利用, 2021(5):167-171.

ZHAO L. Study on cyanide leaching of a floating gold concentrate in Shandong[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(5):167-171.

[13] 杨佐怀, 董越, 郭俊杰, 等. 新疆某金矿选冶联合工艺研究[J]. 矿产综合利用, 2022(3):121-125.

YANG Z H, DONG Y, GUO J J, et al. Beneficiation and metallurgical process study for a gold mine in Xinjiang[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2022(3):121-125.

[14] Guo X, Zhang L, Tian Q, et al. Stepwise extraction of gold and silver from refractory gold concentrate calcine by thiourea[J]. Hydrometallurgy, 2020, 194:105330.

[15] 廖钦桓, 李旭坚. 难浸金矿预处理技术及其应用[J]. 采矿工程, 2017(24):76-78.

LIAO Q H, LI X J. Study on cyanide pretreatment technology of refractory gold ore and its application[J]. Mining Engineering, 2017(24):76-78.

- [16] 冯吉福, 周卫宁, 李尽善, 等. 微细浸染型金矿酸性热压氧化预处理动力学研究[J]. 贵金属, 2017, 38(3):10-16.
- FENG J F, ZHOU W N, LI J S, et al. Study on the kinetics of pretreatment for micro-disseminated sulfide gold ores by acidic autoclave oxidation[J]. Precious Metals, 2017, 38(3):10-16.
- [17] 姚国成, 阮仁满, 温建康. 难处理金矿的生物预氧化技术及工业应用[J]. 矿产综合利用, 2003(1):33-39.
- YAO G C, RUAN R M, WEN J K, et al. Bio-oxidation pretreatment technology for refractory gold ores and its commercial application[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2003(1):33-39.
- [18] Nan X, Cai X, Kong J. Pretreatment process on refractory gold ores with As[J]. ISIJ International, 2014, 54(3):543-547.
- [19] Qin H, Guo X, Tian Q, et al. Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: Oxidation roasting pretreatment and gold extraction[J]. Minerals Engineering, 2021, 164:106822.
- [20] Wu H, Feng Y, Li H, et al. Effect of sodium carbonate on alkaline self-leaching of gold from flotation gold ore[J]. Separation and Purification Technology, 2021, 256:117499.
- [21] Prasad A, Singru R M, Biswas A K. Study of the roasting of pyrite minerals by mossbauer spectroscopy[J]. Physica Status Solidi A, 1985, 1:267-271.
- [22] 赵留成, 李绍英, 孙春宝, 等. 金精矿中性焙烧过程中的物相转变及其磁性特征研究[J]. 矿产保护与利用, 2017(2):69-74.
- ZHAO L C, LI S Y, SUN C B, et al. Study on phase transformation and magnetic properties of gold concentrate in neutral roasting process[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2017(2):69-74.
- [23] Zhang X, Song Y, Wu L, et al. Unraveling the dissociation mechanism of gold in carbonaceous gold ore during vacuum roasting pretreatment: Effect of pyrite[J]. Minerals Engineering, 2022, 184:107658.
- [24] Port S T, Chevrier V F. Stability of pyrrhotite under experimentally simulated Venus conditions[J]. Planetary and Space Science, 2020, 193:105022.
- [25] 辰巳良介. Pretreatment method for gold ore and method for recovering gold from gold ore. JP2017179430A[P]. 2016.03. 29.
- Ryousuke T. Pretreatment method for gold ore and method for recovering gold from gold ore. JP2017179430A[P]. 2016.03. 29.
- [26] Zhang X, Sun C, Xing Y, et al. Thermal decomposition behavior of pyrite in a microwave field and feasibility of gold leaching with generated elemental sulfur from the decomposition of gold-bearing sulfides[J]. Hydrometallurgy, 2018, 180:210-220.
- [27] Li Y, Wang R, Han Y, et al. Phase transformation in suspension roasting of oolitic hematite ore[J]. Journal of Central South University, 2015, 22(12):4560-4565.
- [28] 贾玉娟. 高砷高硫金矿焙砂碱介质物相重构及非氰浸金[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
- JIA Y J. Phase reconstruction and non-cyanide leaching of high arsenic and high sulfur gold calcine in alkali mediums[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [29] Aza A H, Rodríguez M A, Rodríguez J L, et al. Decomposition of dolomite monitored by neutron thermodiffraction[J]. J AM CERAM SOC, 2004, 85(4):881-888.
- [30] Zhang X, Song Y, Wu L, et al. Improvement of the leach efficiency of carbonaceous gold concentrates using reduction roasting pretreatment technology[J]. Advanced Powder Technology, 2022, 33(2):103387.
- [31] Yang Y, Liu J, Wang Z, et al. CO₂-mediated sulfur evolution chemistry of pyrite oxidation during oxy-fuel combustion[J]. Combustion and Flame, 2020, 218:75-83.
- [32] Jin J, Han Y, Li H, et al. Mineral phase and structure changes during roasting of fine-grained carbonaceous gold ores and their effects on gold leaching efficiency[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(5):1184-1190.
- [33] 吴冰. 复杂难处理金矿石预处理工艺研究现状及进展[J]. 黄金, 2020, 41(5):65-72.
- WU B. Current status and progress of the research on complex refractory gold ore pretreatment technology[J]. Gold, 2020, 41(5):65-72.
- [34] Zhang D, Xiao Q, Liu W, et al. Acid leaching decarbonization and following pressure oxidation of carbonic refractory gold ore[J]. Journal of Central South University, 2016, 23(7):1584-1590.
- [35] 张文波. 加压氧化浸出工艺的机理研究[J]. 黄金科学技术, 2011, 19(5):40-44.
- ZHANG W B. Research on the mechanism of pressure oxidation leaching process[J]. Gold Science and Technology, 2011, 19(5):40-44.
- [36] 庄荣传, 黄怀国, 范道焱, 等. 一种含砷精金矿的热压氧化预处理方法:CN201610274495.6[P]. 2018-10-16.
- ZHUANG R C, HUANG H G, FAN D Y, et al. A hot-press oxidation pretreatment method for arsenic-bearing gold concentrates: CN201610274495.6 [P]. 2018-10-16.
- [37] Ng W S, Liu Y, Chen M. The effect of curing on arsenic precipitation and kinetic study of pressure oxidation of pyrite and arsenopyrite[J]. Minerals Engineering, 2022, 185:107675.
- [38] 徐忠敏, 翁占平, 国洪柱. 复杂难处理金精矿加压氧化预处理工艺试验研究[J]. 黄金, 2017, 38(2):54-57.
- XU Z M, WENG Z P, GUO H Z. Experimental study on the treatment of complex refractory gold concentrates by pressure oxidation pretreatment[J]. GOLD, 2017, 38(2):54-57.
- [39] Xu B, Li K, Zhong Q, et al. Study on the oxygen pressure alkaline leaching of gold with generated thiosulfate from sulfur oxidation[J]. Hydrometallurgy, 2018, 177:178-186.

- [40] Zhang L, Guo X, Tian Q, et al. Extraction of gold from typical Carlin gold concentrate by pressure oxidation pretreatment - Sodium jarosite decomposition and polysulfide leaching[J]. *Hydrometallurgy*, 2022, 208:105743.
- [41] Zhang S, Yang H, Ma P, et al. Column bio-oxidation of low-grade refractory gold ore containing high-arsenic and high-sulfur: Insight on change in microbial community structure and sulfide surface corrosion[J]. *Minerals Engineering*, 2022, 175:107201.
- [42] Wu Z, Zhong S P, Wu Z L, et al. Electrochemical behavior of carbon paste electrode with gold-bearing pyrite in bioleaching[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 825:360-363.
- [43] 李骞, 徐斌, 罗君, 等. 一种协同强化细菌氧化预处理含砷金矿的方法:CN108998667A[P]. 2018-12-14.
- LI Q, XU B, LUO J, et al. A synergistic enhanced bacterial oxidation pretreatment method for arsenic-bearing gold ores: CN108998667A[P]. 2018-12-14.
- [44] Mubarak M Z, Winarko R, Chaerun S K, et al. Improving gold recovery from refractory gold ores through biooxidation using iron-sulfur-oxidizing/sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria[J]. *Hydrometallurgy*, 2017, 168:69-75.
- [45] 邢志军, 赵俊蔚, 赵国惠, 等. 一种含砷硫碳的难处理金精矿的二次氧化预处理工艺: CN102011013A[P]. 2011-04-13.
- XING Z J, ZHAO J W, ZHAO G H, et al. A secondary oxidation pretreatment process for hard-to-treat gold concentrates containing arsenic sulfur and carbon: CN102011013A[P]. 2011-04-13.
- [46] Konadu K T, Mendoza D M, Huddy R J, et al. Biological pretreatment of carbonaceous matter in double refractory gold ores: A review and some future considerations[J]. *Hydrometallurgy*, 2020, 196:105434.
- [47] Deng Y, Zhang D, Xia J, et al. Enhancement of arsenopyrite bioleaching by different Fe(III) compounds through changing composition and structure of passivation layer[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2020, 9(6):12364-12377.
- [48] Zhang D, Chen H, Xia J, et al. Humic acid promotes arsenopyrite bio-oxidation and arsenic immobilization[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 384:121359.
- [49] 张世鏢, 郑晔, 帮福末, 等. 一种氧化剂与催化剂协同强化含砷金精矿的氧化预处理方法: CN105907961A[P]. 2016-08-31.
- ZHANG S B, ZHENG Y, BANG F M, et al. An oxidation pretreatment method for arsenic-bearing gold concentrates enhanced by a synergistic oxidant and catalyst: CN105907961A[P]. 2016-08-31.
- [50] Bidari E, Aghazadeh V. Pyrite from Zarshuran Carlin-type gold deposit: Characterization, alkaline oxidation pretreatment, and cyanidation[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 179:222-231.
- [51] Ciminelli V S T, Osseo-Asare K. Kinetics of pyrite oxidation in sodium hydroxide solutions[J]. 1995, 26(4): 677-685.
- [52] Bare G T, Mbayo J J K, Ndlovu S, et al. Mineralogical characterization and acid pretreatment of a gold calcine leach residue[J]. *Minerals*, 2022, 12(1):10.
- [53] 杨永斌, 曾冠武, 李骞, 等. 高硫砷金矿焙砂的硫酸熟化法预处理[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(9):2380-2386.
- YANG Y B, ZENG G W, LI Q, et al. Pretreatment by sulfuric acid-curing of calcine roasting for gold ores with high sulfur and arsenic contents[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2014, 24(9):2380-2386.
- [54] Gui Q, Hu Y, Wang S, et al. Mechanism of synergistic pretreatment with ultrasound and ozone to improve gold and silver leaching percentage[J]. *Applied Surface Science*, 2022, 576:151726.
- [55] Xu G, Deng F, Fan W, et al. Pre-oxidation of refractory gold concentrate by electrochemical methods in alkaline electrolyte[J]. *Materials Today Communications*, 2022, 31:103397.

Recent Advances for Phase Transformation and Reconstruction of Gold-bearing Inclusions during the Pre-oxidation of Refractory Gold Ores

WU Tiantian, SHEN Zhihui, WANG Jianlong, HE Guixu, QIU Yueqin

(College of Mining, Guizhou University, National & Local Joint Laboratory of Engineering for Effective Utilization of Regional Mineral Resources from Karst Areas, Guizhou Key Laboratory of Comprehensive Utilization of Non-metallic Mineral Resources, Guiyang 550025, Guizhou, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Under the background of "double carbon" and "ballast stone" of refractory gold ore resources, pre-oxidation is an effective pretreatment method for efficient gold extraction from refractory gold ores. Destroying the finely impregnated gold inclusions, and

eliminating or avoiding the passivation, robbing or secondary wrapping of gold by harmful substances, are the key and bottleneck problems to determine the gold recovery rate in refractory gold ores. Understanding the phase transformation and reconstruction evolution of gold-bearing minerals during pre-oxidation process is critical for inclusions destruction directly and gold leaching. In this article, the typical characteristics of refractory gold ores and existing pre-oxidation techniques were outlined, and the research advances in phase transformation and reconstruction of gold-bearing inclusions in roasting oxidation, hot-press oxidation, biological oxidation, chemical oxidation and other pre-oxidation processes were summarized. The result shows that the gold-bearing sulfides are mainly transformed into Fe oxides (or As oxides) and sulfate (or arsenate) by pre-oxidation. However, due to the coupling effect of multiple factors such as oxidation temperature, atmosphere or oxygen concentration, pH value, redox potential, Bacterial characteristics, etc., sulfides may also be converted into elemental sulfur, sulfur oxide, thiosulfate, jarosite and scorodite. In addition, jarosite, iron oxide and calcium sulfate are the main solid matters leading to the secondary package of gold. Pre-oxidation process and microscopic mechanisms, such as neutral thermobaric oxidation with low temperature and pressure, bacteria domestication with thermophilic, alkalophilic and arsenic-resistant properties, process enhancement of bacterial oxidation under multi-factor coupling, green and efficient oxidant screening, and chemical oxidation based on multi-field coupling, etc., still need to be deeply researched. The coupling relationship and regulation among ore characteristics, process reaction of pre-oxidation, phase transformation and reconstruction of gold-bearing materials and gold recovery rate are the research hotspots and difficulties in the green and efficient pre-oxidation field for refractory gold ores in the future.

Keywords: Mining engineering; Refractory gold ores; Pre-oxidation; Gold-bearing inclusions; Phase transformation; Phase reconstruction

////////////////////////////////////

(上接第 84 页)

Sichuan Dechang Continental Trough Rare Earth Ore Beneficiation Process

XU Jianxin

(China Rare Earth (Liangshan) Co., Ltd., Xichang 61500, Sichuan, China)

Abstract: This is an article in the field of mineral processing engineering. The Mianning-Dechang rare-earth mineralization belt in Sichuan is an important hard-rock-type rare-earth mineralization belt associated with Late Oligocene-Middle Miocene carbonatites in China. Within this metallogenic belt, there are Yakpeng super-large, Continental Trough large, Muluo and Lizhuang medium-sized light rare earth deposits closely associated with nepheline quartz orthoclase-carbonate heteroliths; the identified rare earth resource reserves (REO) in this metallogenic belt amount to several million t, which account for 8.73% of the identified resources in the country, and it is an important hardrock-type rare earth resource base in China. The advantage of rare earth resources in the continental trough over the Maoniuping is that the ore body is thick and large, easy to mine, the average grade of REO is 1%~2% higher than that of Maoniuping, and the rare earth distribution rate in the ore endowed with cerium fluorocarbon (CeFc) mineral phase is high, and the amount of ThO₂ in Cerium Fluorocarbon (CuFc) is small (Maoniuping 0.18%~0.43%), which is very favorable to the deep-processing and environmental protection. This article is based on rare earth beneficiation production practice, summarizes the different periods of production process on the recovery and utilization of rare earth resources, the continental trough rare earth beneficiation process puts forward new thinking and insights, for the rational use of rare earth resources to provide reference basis.

Keywords: Mineral processing engineering; Continental trough mine; Rare earth; Magnetic separation - re-election - flotation joint process