

doi: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.12.013

难处理金矿预处理技术研究进展及工业应用现状

朱幸福¹, 钟寿国², 徐超¹, 董中林², 李光胜¹, 吴金甜², 杨新华¹, 姜涛², 徐斌²

(1. 山东黄金矿业科技有限公司 选冶实验室分公司, 山东 烟台 261441;

2. 中南大学 资源加工与生物工程学院, 长沙 410083)

摘要: 随着易选冶型金矿资源的逐渐枯竭, 难处理金矿已成为黄金生产的主要来源。系统综述了难处理金矿的4种预处理技术(焙烧氧化法、加压氧化法、生物氧化法、超细磨矿法)的研究进展及工业应用现状。焙烧氧化法适合处理含硫含碳金矿, 通过高温分解硫化物释放包裹金, 技术成熟但存在有害气体排放问题; 加压氧化法适合处理高硫低碳型金矿, 在高温高压下高效氧化硫化物, 金回收率高, 但设备投资成本高; 生物氧化法适合处理硫化物型金矿, 利用微生物氧化硫化物, 绿色环保, 但预处理周期长, 菌种适应性受限; 超细磨矿法适合处理细粒包裹型金矿, 通过物理破碎暴露金颗粒, 需结合其他预处理方法提升效率。未来, 多技术协同工艺(如生物氧化+超细磨)、资源综合回收、无害化生产及设备智能化是预处理技术的发展方向。

关键词: 难处理金矿; 焙烧氧化法; 加压氧化法; 生物氧化法; 超细磨矿法; 工业应用

中图分类号: TF831

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2025)12-0123-14

引用格式: 朱幸福, 钟寿国, 徐超, 等. 难处理金矿预处理技术研究进展及工业应用现状[J]. 有色金属(冶炼部分), 2025(12): 123-136. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.12.013.

ZHU Xingfu, ZHONG Shouguo, XU Chao, et al. Research Progress and Industrial Application Status of Pretreatment Technologies for Refractory Gold Ores[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2025(12): 123-136. DOI: 10.20237/j.issn.1007-7545.2025.12.013.

金具有优良的物理化学性质, 在地壳中含量极低, 广泛用于货币储备、首饰材料、电子器件等, 在国家发展进步中扮演重要角色^[1]。据统计, 近十年来, 全球黄金产量呈现波动上升态势, 2018年达到历史峰值3 656 t, 随后因矿山老化、环境政策收紧等因素略有下降^[2]。中国自2007年起连续17年蝉联全球最大黄金生产国, 2024年, 中国黄金产量534.11 t(同比增长2.85%), 其中国内矿产量377.24 t, 进口原料加工量156.86 t^[3]。中国2013—2022年消费量年均超1 000 t, 长期为全球最大黄金消费国。2023年因经济放缓及金价上涨, 消费量首次显著下滑。2024年总消费量为985.31 t(同比下降9.58%)^[4]。根据美国地质调查局(USGS)2025年数据^[5-7], 全球已探明黄金储量约为64 000 t, 储量前十的国家及占比如图1所示, 其中中国黄金储量为3 100 t, 占全球总储量的4.84%, 排名全球第六。在全球金矿储量中, 难处理

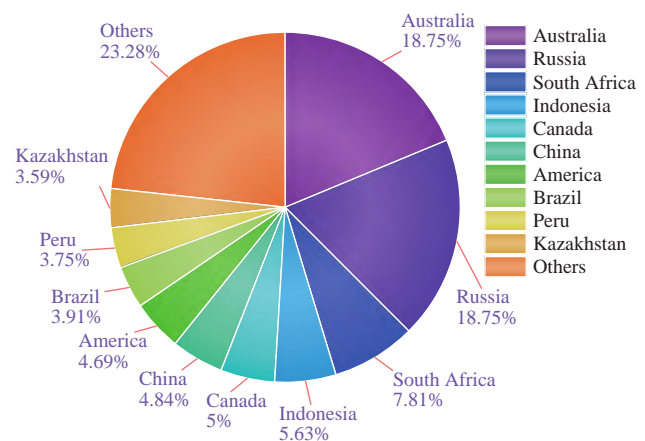


图1 全球金矿资源储量分布^[7]

Fig. 1 Global distribution of gold mine reserves in 2024^[7]

金矿约占黄金总储量的30%, 约19 200 t, 而在中国, 难处理金矿约占黄金总储量的60%以上^[8]。当前, 随着金矿床开采规模的扩大, 易选冶型金矿逐渐枯竭,

收稿日期: 2025-07-07

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52174271); 国家自然科学基金基础科学中心项目(72088101)

作者简介: 朱幸福(1984—), 男, 博士, 高级工程师; 通信作者: 徐斌(1982—), 男, 博士, 教授

难处理金矿成为黄金生产的主要来源^[9-10]。

采用氰化物浸出金矿石,根据金回收率的高低,可将金矿石细分为高度难处理型金矿、中度难处理型金矿、轻度难处理型金矿、易选冶型金矿四个等级,对应的金回收率分别为 50% 以下、50%~80%、80%~90%、90% 以上^[11]。一般中度难处理型金矿和高度难处理型金矿统称为难处理金矿,即难处理金矿是指采用常规氰化浸出,金回收率低于 80% 的金矿^[12]。难处理金矿难浸原因主要有三个方面^[13-16]:一是难处理金矿中的金嵌布粒度极细,主要以显微金或次显微金形成存在,且常与黄铁矿、毒砂等硫化矿伴生并被包裹,金难与浸出剂接触;二是金矿石中存在许多易耗氰或易耗氧的硫化矿(如磁黄铁矿、黄铜矿等);三是金浸出后被金矿中的“劫金”矿物(如有机碳、黏土类矿物等)再次吸附。难处理金矿大多属于“双重”或“多重”难处理金矿,表 1 对常见难处理金矿类型进行了总结^[17]。

表 1 常见难处理金矿石类型及难处理原因^[17]

Table 1 Common types of refractory gold-bearing ores and the reasons for their refractoriness^[17]

矿石类型	难处理原因
碳质矿石型/含泥金矿	浸出金被有机碳、黏土类、泥类等“劫金”物质吸附
黄铜矿、磁黄铁矿型	次显微金的包裹体,耗“氰”耗“氧”
黄铁矿/毒砂/雄黄/雌黄/硫砷锑矿型	亚显微金的包裹体
硫酸盐型	金与硫酸盐(如硫砷银矿)共生
碲化物型	金-碲矿物,金以碲化金或不溶性合金形式存在难以溶解
包裹体型	细粒金被石英或硅酸盐包裹
硫化铅型	银与铅、锑、铋等的硫化物(如硫锑铅)共生
硫砷铜矿型	银与富锑和贫锑的硫砷铜矿类矿物共生
难浸硅质矿型	金与石英、玉髓或非晶质石英的亚微粒级共生

根据难处理金矿的矿石特性,在使用提金剂浸金之前,首先需要对其预处理,目的包括:使矿物结构破坏,充分暴露金颗粒,除去易“劫金”的有机碳、黏土等矿物以及改变金矿(如碲化金矿)的矿石特性等^[17-18],进而提高金回收率。根据 Global Milling Reserch 公司 2018 年黄金产量的一项调查,全球 31% 的黄金产量来自于难处理金矿,主要采用加压氧化法、焙烧氧化法、生物氧化法、超细磨矿法这 4 种预处理方法^[19]。预处理工序是难处理金矿提取金至关重要的一步,本文主要对上述 4 种预处理方法的原理、工艺发展和生产应用情况进行介绍,然后对 4 种

技术进行了对比和展望,以期能为预处理技术的选择及优化提供理论依据与参考。

1 焙烧氧化法

焙烧氧化法是指通过焙烧将包裹金的硫化矿、硅酸盐、碳酸盐等矿物分解,使其中的微细粒金最大限度地暴露,提高后续氰化浸金率^[20]。焙烧氧化处理后金矿表面会变得疏松多孔,裂纹变多和变深,有利于增大浸出剂与金的接触面积,提高浸金率^[21]。焙烧氧化法是第一个用于难处理金矿的预处理技术,也是目前技术最成熟、应用最广泛的技术,其具有技术可靠,操作简单,对原料适应性强等特点^[22-23]。但是焙烧过程中产生大量 SO₂、As₂O₃ 等气体,对废气处理系统要求高,对工厂周边环境影响大,此外,焙烧过程中若温度控制不恰当,容易出现“欠烧”或“过烧”现象^[24-26]。多年来,随着环境政策的严格和替代工艺的相继出现,焙烧氧化法的应用大大减少。对于碳质类金矿,通过焙烧不仅可以使硫化物充分氧化使金暴露,而且可使影响后续氰化浸出的碳质物(有机碳、石墨等)氧化或者失活,显著提高金的回收率,优于加压氧化法^[27]。

随着科技的快速发展和国家环保政策的严格,促进了焙烧氧化法在技术和设备上的快速发展。技术方面,由传统的单段氧化焙烧发展出两段氧化焙烧、富氧焙烧、固硫(砷)焙烧、循环沸腾焙烧、闪速焙烧、球团包衣焙烧法、微波焙烧法等新技术^[22,28-30]。历史上各种焙烧技术的首次工业应用整理如表 2 所示^[31-32],近些年出现的球团包衣焙烧法、微波焙烧法这些技术还停留在实验室阶段,没有工业应用实例。焙烧设备方面,在 20 世纪 40 年代之前,主要是回转窑和多膛式焙烧炉。1940 年以后,随着工业的发展,相继又出现了流化床焙烧炉和循环流化床焙烧炉(CFB)。1980 年后,出现了富氧流化床焙烧炉^[26]。国内主要采用焙烧氧化法处理金精矿的提金工厂如表 3 所示^[16,33]。

难处理金矿中包裹金的主要是黄铁矿和毒砂,

表 2 历史上各种焙烧技术的首次工业应用^[31-32]

Table 2 The first industrial application of various roasting technologies in history^[31-32]

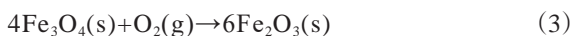
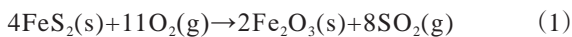
公司	国家	年份	技术	处理量/(t·d ⁻¹)
Goldfields	南非	1969	单段焙烧	250
North Kalgoorlie	澳大利亚	1989	循环沸腾焙烧	575
Sprott Mining	美国	1989	富氧焙烧	3 600
Freepotr McMoRan	美国	1990	两段焙烧	3 200
Newmont	美国	1996	固化焙烧	2 160

表3 国内主要采用焙烧氧化法处理金精矿的提金工厂^[16,33]Table 3 Domestic gold extraction plants primarily utilizing the roasting oxidation process to treat gold concentrates^[16,33]

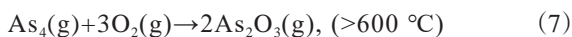
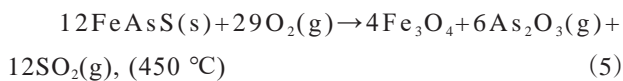
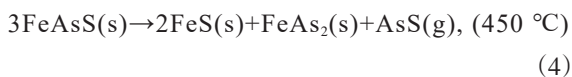
企业名称	运行年份	地点	处理原料类型	工艺	设备配置	规模/(t·d ⁻¹)
山东恒邦冶炼股份有限公司	1994	牟平	高砷/高硫金精矿	两段焙烧	2套	380
山东国大黄金股份有限公司	1999	招远	高砷/高硫/含碳复杂金精矿	两段焙烧	1套	1 200
灵宝黄金集团股份有限公司	2003	灵宝	含高砷/高硫复杂金精矿	一段焙烧	4台	1 000
灵宝金源晨光有色矿冶有限公司	2005	灵宝	含铜铅锌复杂硫金精矿	一段焙烧	1台	900
湖南中南黄金冶炼有限公司	2006	平江	高砷高硫金精矿	两段焙烧	1套	200
河南中原黄金冶炼厂	2008	三门峡	含铜铅锌复杂硫金精矿	一段焙烧	2台	150
潼关中金冶炼有限责任公司	2009	潼关	含铜铅锌复杂硫金精矿	两段焙烧	1台	250
甘肃招金贵金属冶炼有限公司	2018	临洮	高砷/高铋难处理金精矿	两段焙烧	1套	1 000
辽宁新都黄金有限责任公司	2019	朝阳	含铜复杂硫金精矿	一段焙烧	1台	800

两种矿物的焙烧氧化机理分别如式(1)~(3)和(4)~(7)所示^[34-35]。

黄铁矿:



毒砂:



QIN等^[36]针对某难处理金矿(直接氧化浸出金浸出率低于50%),采用“两段焙烧—硫脲浸出—增强氯化焙烧”的流程进行研究。两段焙烧时,一段焙烧温度500 °C,以10 mL/min的空气流速焙烧45 min,然后在650 °C以100 mL/min的空气流速焙烧60 min,焙砂使用硫脲浸出,之后将浸出残渣与黄铁矿、氯化钙混合后焙烧,进一步回收残留金。结果表明,采用两段焙烧能成功去除砷(96.98%)和硫(97.19%),金暴露率可提升至84.11%,同时硫脲浸出与氯化焙烧的结合,金的总回收率可达98.06%。

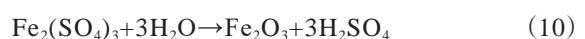
LI等^[37]针对陕西省某碳质金矿,总碳为6.39%(其中有机碳1.33%,石墨碳1.50%,碳酸盐矿物碳3.56%),使用HB-J-30旋转电阻加热炉在650 °C下焙烧2 h,通风量0.6 m³/h,焙砂采用0.3% NaCN溶液浸出,金浸出率可达92.55%。HAAPID等^[38]针对印度尼西亚西瓜哇省Garut地区的难处理金矿,首先向金矿中添加水合NaClO₃(氧化剂)进行微波辅助焙烧,微波功率400 W,温度470 °C,时间30 min,氧化硫化物打开金的包裹。之后在温度50 °C下水浸60 min,提取可溶金属Cu、Zn、Pb、Fe,溶解率分别

为84.3%、97.6%、22.8%、8.4%。最后对水浸渣采用3 mol/L HCl+5% NaClO₃浸出,在温度40 °C,液固比10:1的条件下,金的浸出率为92.5%,相较于未经过微波预处理的金矿(仅47.5%),浸出率提高了45个百分点。

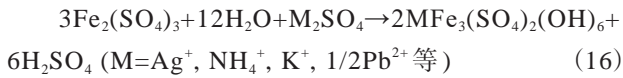
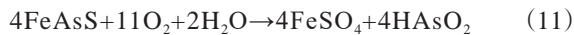
2 加压氧化法

加压氧化法(POX)是一种湿法处理技术,是指在高温、高压、有氧的环境下,在酸性或碱性浸出体系中氧化分解包裹金的硫化物,促进后续氰化法提金的进行。具体采用酸性还是碱性加压浸出,需根据金矿脉石矿物的酸浸特性及含量决定^[16,39-40]。当金矿的脉石矿物主要为易耗碱的酸性物质(如石英及硅酸盐等)时,采用酸法加压氧化法。反之,采用碱法加压氧化法。酸性加压氧化法常用浸出介质为H₂SO₄,反应条件为:温度180~225 °C,总压2.0~3.5 MPa,氧分压0.35~0.7 MPa,反应时间0.5~2.0 h。难处理金矿中包裹金的主要成分黄铁矿和砷黄铁矿化学反应分别如反应式(8)~(10)和(11)~(14)所示^[39,41-46]。黄铁矿中的铁经过氧化最终生成稳定的氧化铁,砷黄铁矿经过一些列氧化反应,砷会以环境友好的砷酸铁形式被固定在渣中。黄铁矿和砷黄铁矿中的铁在氧化过程中也会伴随一些副反应的发生(式(15)~(16))^[47-48],产生的碱式硫酸铁(温度160~200 °C, H₂SO₄浓度>20 g/L)和黄钾铁矾(温度140~200 °C, H₂SO₄浓度>20 g/L)会对解离释放的金形成二次包裹,故酸性加压氧化法还涉及碱式硫酸铁的转型和黄钾铁矾的分解步骤^[49-50]。

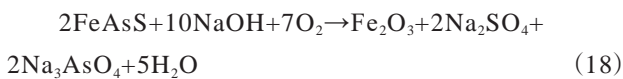
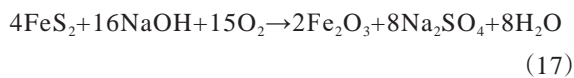
黄铁矿:



砷黄铁矿:



碱性加压氧化法适合处理脉石矿物呈碱性或弱酸性的难处理金矿,此时黄铁矿、毒砂等矿物中的硫和铁会被氧化分解为氧化铁和硫酸盐,砷转化为砷酸盐(式(17)~(18))。碱性加压氧化法最早应用于从铝土矿中提取氧化铝^[51]。1988年, Barrick Gold公司建成了世界上第一家碱性加压氧化工厂。



国内外生产实践证明,加压氧化法是一种稳定有效的工艺,金回收率高^[52],无有害气体的产生,砷以稳定的砷酸盐存在,对环境友好,既可以处理原矿也可以处理金精矿^[1]。然而,加压氧化法需要在高温高压设备里进行,设备还需要耐酸/碱,对设备材质要求高,设备投资大,工艺控制精度高,设备维护成本大,碱性介质氢氧化钠价格昂贵^[53]。此外,对于碳含量高的金矿,加压氧化法不如焙烧氧化法^[48]。

LEE等^[54]针对美国Goldstrike矿的双难处理金矿(既含碳又含硫)进行了预处理+硫代硫酸盐浸出研究。首先采用碱性加压氧化预处理,由于该过程生成的赤铁矿对金形成了二次包裹,金浸出率仅有59.5%。随后采用机械活化预处理,其条件为:球料比5:1、矿浆质量浓度50%、研磨时间60 min,使颗粒 P_{80} 从56.5 μm 降至8.54 μm (P_{80} 指“80%的颗粒通过的粒径”),之后使用0.2 mol/L $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 和50 mg/L Cu^{2+} 浸出24 h,金浸出率提高至72.1%。浸出渣中的残留金由于嵌布粒度过细(<2 μm)且仍被硫化物包裹,难以进一步浸出。

BODUEN等^[55]针对哈萨克斯坦Bestobe矿床的高硫难处理金精矿进行了搅拌槽生物氧化(STRB)+POX+氰化浸出研究。主要硫化矿物黄铁矿(FeS_2)、毒砂(FeAsS)的含量分别为24.1%和32.8%,硫、砷含量分别为24.4%和21.3%。金矿未经过预处理而直接氰化浸出,金浸出率为58%。采用单独STRB预处理6 d后,硫氧化率仅为78.7%,金回收率提高至87%。采用单独POX预处理,硫接近完全氧化(99%),金回收率达到98%。而采用STRB+POX组合预处理,硫氧化率为98%左右,金回收率提高至97%左右,与单独POX预处理相当。采用组合预处理的优势在于可以提高POX的效率,使用STRB可以降低原矿硫含量,在POX时可以提高POX矿浆浓度,同时可以减少氰化物消耗和降低综合成本。

LEMOS等^[56]针对巴西米纳斯吉拉斯州Faina Project的硫化物包裹型难处理金矿采用POX+氰化浸出研究。硫化物矿物为毒砂(13.9%)、磁黄铁矿(10.2%)、黄铁矿(1.3%)。采用酸性POX+氰化浸出,金回收率为98.40%(220 $^{\circ}\text{C}$)。而作为对比,采用碱性POX+氰化浸出,金回收率仅为79.21%,效果显著低于酸性条件,高温高压酸性环境可以极大地促进硫元素的氧化,使金充分暴露。

SURIMBAYEV等^[57]针对一种硫化物型难处理金矿采用加压氧化预处理与浸出同步进行的研究。主要矿物为黄铁矿(64.2%)和石英(11.6%)。在氧分压0.5 MPa、温度75 $^{\circ}\text{C}$ 、氰化钠浓度6 g/L的条件下,加压氧化预处理与浸出同步进行,浸出90 min后,金浸出率达到95%,显著高于传统氰化法(46%)。

国内外加压氧化法工业应用实例总结如表4所示^[58-59]。1985年,世界上第一家难处理金矿酸性加压氧化厂由美国Homestake公司在内华达州McLaughlin金矿建立^[39]。随后该工艺的应用获得了快速发展,在世界范围内获得了广泛应用。2016年,紫金矿业在贵州建立了水银洞金矿酸性加压氧化工厂,日处理量450 t,这是中国首个自主设计建造的加压氧化工厂,技术达国际领先水平。

表 4 国内外采用加压氧化法的部分提金工厂^[58-59]Table 4 Some gold extraction factories utilizing the pressurized oxidation method both at home and abroad^[58-59]

金矿/工厂 (国家)	运营公司	处理矿石/精矿	日处理能力/t	温度/°C	压力/kPa	运营时间
McLaughlin 金矿 (美国)	Homestake Mining Company (1985—1990); Barrick Gold Corporation (1990—2002)	金矿石	2 700	180	—	1985—2002
Sao Bento 金矿 (巴西)	Sao Bento Mineracao(1986—2006); Yamana Gold (2006—2019)	金精矿	240	190	1 600	1986—2019
Mercur 金矿 (美国)	Barrick Gold Corporation	金矿石	680	220	3 135	1988—1995
Turquoise Ridge 金矿 (美国)	Newmont Corporation	金矿石	2 730	210	2 800	1989 至今
Goldstrike 金矿 (美国)	Barrick Gold Corporation	金矿石	1 600	225	2 900	1990 至今
Porgera 金矿 (巴布亚新几内亚)	Porgera Joint Venture	金精矿	1 215	195	—	1991—2020
Campbell Red Lake 金矿 (加拿大)	Newmont Corporation	金精矿	71	195	2 200	1991 至今
Con 金矿 (加拿大)	Miramar Mining Corporation	金精矿	90	210	—	1992—2003
Lone Tree 金矿 (美国)	Nevada Gold Mines	金矿石	2 270	190	—	1994—2006
Twin Creeks 金矿 (美国)	Newmont Corporation	金矿石	7 260	225	—	1996 至今
Lihir 金矿 (巴布亚新几内亚)	Newmont Corporation	金精矿	8 100	210	—	1997 至今
Hillgrove 金矿 (澳大利亚)	Hillgrove Resources	金精矿	24	220	—	1999—2014; 2020 年 重启运营
Macraes 金矿 (新西兰)	OceanaGold Corporation	金精矿	20	225	—	1999 至今
Kittila 金矿 (芬兰)	Agnico Eagle Mines	金精矿	500	190	—	2008 至今
Amursk-1 POX(工厂) (俄罗斯)	Polyus Gold	金精矿	225 000 [*]	200	—	2012 至今
Pueblo Viejo 金矿 (多米尼加)	Pueblo Viejo Dominicana Corporation	金矿石	24 000	230	—	2013 至今
贵州水银洞金矿 (中国)	紫金矿业集团有限公司	金矿石	450	200~220	—	2016 至今
Amursk-2 POX(工厂) (俄罗斯)	Polyus Gold	金精矿	1 370	205~210	3 500	规划中, 未投产(原计划 2025 年投产)

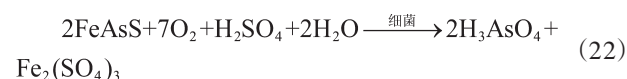
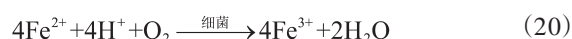
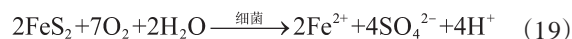
注: * 为年处理能力。

3 生物氧化法

生物氧化法是指利用微生物将包裹金的黄铁矿、毒砂等硫化物氧化而暴露金颗粒,方便后续采用氰化法或其他方法高效回收金。生物氧化法氧化硫化物的同时不破坏载金矿物的骨架,更有利于下一步的固液分离和氰化作业^[60-61]。此法具有操作简单、绿色环保、经济有效的特点,与传统焙烧氧化法和加压氧化法相比,生物氧化法能实现粉尘的零排放^[62],已获得了大规模的工业化应用。然而,生物氧化法对原料的矿物组成要求高,生物氧化过程中,毒砂易氧化,而黄铁矿难氧化^[63]。同时,生物氧化预处理需要 1~4 周,生产周期长,效率低^[62,64],预处理完成后的酸性废水中和成本高。

生物氧化法从出现以来,其浸矿反应机理一直存

在争议。先后提出了直接/间接作用生物浸出机制。LARSSON 等^[65]认为“直接作用”促进了矿物的溶解,其它一些观点认为“间接作用”机理是生物氧化的原则机理^[66]。随着对细菌作用机理研究的发展和深入,人们认为“直接作用”机理不存在^[67]。20 世纪末,有学者又提出了“接触/非接触氧化”机理,按照该机理,金属硫化物通过 Fe³⁺ 氧化溶解,同时 Fe³⁺ 变为 Fe²⁺,而 Fe³⁺ 则通过附着于矿物表面的或浮游的微生物氧化 Fe²⁺ 得以再生^[68]。金属硫化物黄铁矿、毒砂的氧化按反应式(19)~(22)进行^[64,69-70]。



SASAKI等^[71]针对Syama双难处理金精矿(含碳/硫,简称SYM矿)和一种碳质金矿(简称PFC矿)开展了生物氧化预处理(BIOX[®])+草酸洗涤+硫脲浸出研究。Syama双难处理金精矿主要矿物黄铁矿和总碳含量分别为26.40%和4.16%,碳质金矿总碳含量为2.15%。使用铁氧化菌(*Acidimicrobium ferrooxidans* ICP)、硫氧化菌(*Acidithiobacillus caldus* KU)的混合菌种,在45℃,pH 2.0条件下预氧化2~3周,随后使用草酸洗涤去除次生矿物黄钾铁矾。SYM矿和PFC矿经预处理后采用硫脲浸金,在5 mmol/L硫脲,4.7 μmol/L Fe³⁺,pH=1(H₂SO₄调节),60℃,125 r/min的条件下,分别浸出12 h和5 h,SYM矿和PFC矿的浸金率均接近100%。作为对比,作者针对SYM矿还开展了BIOX[®]+氰化浸出和针对PFC矿开展了直接氰化浸出试验,SYM矿和PFC矿的浸金率最高只能分别达到80%和60%,原因是存在碳质物质“劫金”。采用BIOX[®]+硫脲浸金无碳质物质吸附金的问题,金浸出率接近100%,同时采用阳离子交换树脂(DIAION PK216LH)可高效回收金-硫脲络合物(>99.9%),无需高温焙烧和避免氰化物使用,减少环境污染,为禁止氰化法地区的双难处理金矿提供了经济可行的解决方案。

MCNEICE等^[64]针对3种高硫难处理金精矿(RC1、RC2、RC3),黄铁矿含量分别为20.33%、17.42%和20.02%,分别采用生物氧化和常压氧化+超细磨的预处理,之后对比了氰化浸金效果。生物氧化使用混合培养的嗜酸性铁硫氧化菌*Acidithiobacillus ferrooxidans*(ATCC 19859)、*Acidithiobacillus thiooxidans*(ATCC 19377)和*Leptospirillum ferrooxidans*(DSMZ 1931),试验条件:温度35℃、pH 1.7~2.3、周期15~26 d。常压氧化+超细磨预处理条件为:在95℃、pH 5.5条件下进行中性常压氧化后,再超细磨至粒度小于12 μm。未经预处理的金矿氰化浸金率低于50%,而生物氧化预处理后金的浸金率最高可达87%,常压氧化+超细磨预处理后浸金率最高可达85%。两种预处理方式均显著提高了金浸出率,但中性常压氧化预处理经济效益更高。

应用于生物氧化技术的微生物主要包括铁氧化菌和硫氧化菌,一般属于化能自养型,嗜酸、好氧,以空气中的CO₂为碳源^[72]。当前可用于生物氧化难处理金矿的微生物有20余种^[73],如表5所示^[68,73],而在工业上常用的微生物主要有4种^[74],包括:氧化硫硫杆菌(*Acidithiobacillus thiooxidans*,简称A.t菌)、氧

表5 可用于生物氧化难处理金矿的微生物^[68,74]

Table 5 Microorganisms applicable to the bioreduction of refractory gold ore^[68,74]

微生物种类	代谢类型	氧化能力	
		Fe ²⁺	S ⁰
<i>Acidithiobacillus</i> (At.) <i>ferrooxidans/ferrovorans</i>	无机自养型	+	+
<i>At. caldus</i>	无机自养型	-	+
<i>At. thiooxidans</i>	无机自养型	-	+
<i>Acidiferrobacter thiooxydans</i>	无机自养型	+	+
<i>Leptospirillum</i> (L.) <i>ferriphilum</i>	无机自养型	-	+
<i>L. ferrooxidans</i>	无机自养型	+	-
<i>Sulfobacillus</i> (Sb.) <i>thermosulfidooxidans</i>	无机自养型	+	+
<i>Sb. benefaciens</i>	无机自养型	+	+
<i>Sb. thermotolerans</i>	无机自养型	+	+
<i>Alicyclobacillus</i> spp.	无机自养型	+	+
<i>Acidiphilium</i> spp.	大多数菌株为专性异养型	+	-
<i>Acidimicrobium ferrooxidans</i>	异养型	+	
<i>Ferrimicrobium acidophilum</i>	异养型	+	
<i>Ferropasma acidophilum</i>	异养型	+	
<i>Acidiplasma cupricumulans</i>	异养型	+	
<i>Sulfolobus</i> (S.) <i>metallicus</i>	无机自养型	+	
<i>S. shibatae-like</i>	兼性无机化能自养	-	+
<i>Metallosphaera</i> spp.	兼性无机化能自养	+	+
<i>Acidianus</i> (Ac.) <i>brierleyi</i>	无机自养型	+	+
<i>Ac. Infemus-like</i>	无机自养型	-	+
<i>Sulfurisphaera ohwakuensis-like</i>	异养型	+	-

注:“+”表示能氧化,“-”表示不能氧化。

化亚铁硫杆菌(*Acidithiobacillus ferrooxidans*,简称A.f菌)、氧化亚铁钩端螺旋菌(*Leptospirillum ferrooxidans*,简称L.f菌)和耐热氧化杆菌(*Sulfobacillum thermosulfidooxidans*),前3种属于中温菌,适宜生长的pH为1.2~1.5。A.f菌是最常用的浸矿细菌,其易分离培养,对浸出液中的Cu²⁺、Fe³⁺、Mg²⁺等金属离子具有耐受性,但需要注意使用温度不能超过40℃。根据微生物适宜的生长温度,可分为嗜热微生物(15~30℃)、中度嗜热微生物(30~55℃)和极端嗜热微生物(55~95℃)^[75-76]。

目前国内外采用生物氧化预处理技术的主要生产厂家如表6所示^[77-79]。生产上比较成熟且有广泛应用的生物氧化工艺主要有BIOX[®]、BACOX[®]、Geobiotics[®]、CCGRI[®]等^[74,79]。BIOX[®]是第一个开发的生物氧化工艺,由南非GENCOR公司开发,1986年首次应用于Fairview工厂^[80]。BACOX[®]于1994年在澳大利亚Youanmi金矿率先获得应用^[81-83],我国的山东天承金业公司也于2001年引入了该技术。CCGRI[®]技术由我国长春黄金研究院开发,并于2000年在烟台黄金冶炼厂得到应用,这也是我国首个应用

表6 国内外采用生物氧化预处理技术的主要工厂^[77-79]Table 6 Major factories utilizing the biological oxidation pretreatment technology both at home and abroad^[77-79]

金矿/工厂	运营公司	国家	工艺/技术	日生产规模/t	运营时间
Fairview金矿	Barberton Mines	南非	BIOX [®]	35	1986至今
Sansu金矿	Gold Fields	南非	BIOX [®]	100	1989至今
Sao Bento金矿	Yamana Gold	巴西	BIOX [®]	150	1990—2015
Harbour Light金矿	Resolute Mining	澳大利亚	BIOX [®]	40	1992—1994
Wiluna金矿	Wiluna Mining Corporation	澳大利亚	BIOX [®]	154	1993至今
Youanmi金矿	Auriferous Mining	澳大利亚	BACOX [®]	120	1994—2000
Tambomayo金矿	Buenaventura Mining Company Inc.	秘鲁	BIOX [®]	—	2017至今
Carlin金矿	Newmont	美国	Geobiotics [®] (堆浸)	10 000	1999至今
Tasmania金矿	Bass Metals	澳大利亚	BACOX [®]	68	2000至今
Suzdal金矿	Polymetal	俄罗斯	BIOX [®]	192	2005至今
Fosterville金矿	Agnico Eagle Mines	澳大利亚	BIOX [®]	211	2005至今
Bogoso金矿	Future Global Resources	加纳	BIOX [®]	750	2006至今
Agnus金矿	Pan African Resources	南非	BIOX [®]	20	2010至今
烟台黄金冶炼厂(工厂)	山东黄金集团有限公司	中国(山东烟台)	CCGRI [®]	80	2000至今
新城金矿	山东天承生物金业有限公司	中国(山东莱州)	BACOX [®]	100	2001至今
排山楼金矿	辽宁天利金业有限责任公司	中国(辽宁凤城)	CCGRI [®]	100/200(2017扩产)	2003至今
金山金矿	江西省三和金业有限公司	中国(江西德兴)	CCGRI [®]	80	2004至今
阿希金矿	西部黄金股份有限公司	中国(新疆伊宁)	吉林冶金研究院技术	80	2007至今
金翅岭金矿	山东黄金集团有限公司	中国(山东招远)	CCGRI [®]	100	2007至今
烂泥沟金矿	贵州锦丰矿业有限公司	中国(贵州贞丰)	BIOX [®]	750	2007至今
乌拉嘎金矿	中国黄金集团有限公司	中国(黑龙江)	CCGRI [®]	120	2009至今

的生物氧化技术^[84]。

4 超细磨矿法

难处理金矿中的金嵌布粒度极细,大多数以显微或亚显微的形式被包裹于矿物中,将矿石粉碎至10~15 μm以下,达到微米级或亚微米级^[58,85-86],提高金颗粒的暴露面积,可使氰化浸金率获得显著提升。不同于普通细磨,超细磨需要使用特殊的设备,采用更小尺寸的磨矿介质和更高的转速,达到理想粒度要求^[58,85]。超细磨采用惰性介质(陶瓷球),可避免铁介质进入金矿中,影响矿石的浮选性能,也避免了浮选药剂消耗的增加^[58],同时超细磨粒度分布窄,可以减少过磨和欠磨,且不需要进行筛分而直接进入下一个工序^[85,87-88]。但是该方法的设备投资成本高,需频繁更换介质,介质磨损成本高^[58]。超细磨可作为难处理金矿单一的预处理工艺,也常与其他预处理工艺结合使用。

Abrahan Barriga对西班牙北部Salave项目的难处理金精矿进行了超细磨+常压弱酸性氧化预处理+氰化炭浸(CIL)研究^[89],其中金主要赋存于毒砂(FeAsS)和黄铁矿(FeS₂)中,呈亚显微包裹体(需预氧化释放)。由于Salave项目不同矿化层的金精矿硫/砷含量不相同,作者又将该金精矿分为Upper Zone和Lower Zone两组,采用不同的条件进行试验。针

对Upper Zone金精矿,先采用超细磨(30 kWh/t)然后再CIL,回收率仅为50%($P_{80}=10.3 \mu\text{m}$),而通过30 kWh/t超细磨+pH 4.4常压氧化+30 h CIL,硫氧化率84.6%,金回收率可达96%。针对Lower Zone金精矿,通过60 kWh/t超细磨(因砷含量高需更高能量)+pH 4.8常压氧化+CIL,金回收率可达95%。结果表明,超细磨与常压氧化组合可有效释放包裹金,避免高压氧化或生物氧化的高成本问题,且产物对氰化物稳定,无需洗涤流程。

蔡创开^[90]针对高硫难处理金精矿(西北某矿山)采用了超细磨—碱预处理—氰化工艺提金的研究。金主要被黄铁矿包裹,含砷(2.21%)、硫(39.82%)、铁(35.77%)等。金精矿先使用Y71M2-4型立式搅拌球磨机超细磨至细度 $P_{80}=2.21 \mu\text{m}$,然后在NaOH加入量40 kg/t, 60 °C下搅拌曝气24 h,氰化浸金率可达84.5%,相较于直接氰化浸出(47.91%)效果显著提高。杨建伟^[91]针对甘肃陇南的某高砷金精矿,首先采用超细磨ALC-1.5L型艾砂磨机(介质为1.8~2.0 mm陶瓷球)细磨至 $P_{80}=10 \mu\text{m}$,然后使用过氧化氢预氧化1 h,再采用绿金浸出,浸金率可以达到78.6%。

工业中主流的超细磨设备基本都是采用高速搅拌研磨技术,其功率强度极高,约为300 kW/m³,而普通球磨机的功率强度仅有20 kW/m³,虽然高速

搅拌研磨技术的功率高,但由于达到目标粒度的磨矿时间较短,总能耗较低。根据搅拌方式的不同,超细磨机有 Vertimill® 立式磨机、IsaMill® 水平磨机、Detritor 磨机(SMD)、HIGmill®、ALC 系列卧式 Isa 磨机等^[57,87]。其中,垂直定向的低速螺旋式搅拌 Vertimill® 立式磨机的功率强度为 4 kW/m³,水平定向的高速圆盘型搅拌 IsaMill® 磨机的功率强度为 400 kW/m³,垂直定向的高速针式搅拌 Detritor 磨机的功率强度为 150 kW/m³。HIGmill® 是 2012 年由 Swiss Tower Mills Minerals AG(STM) 公司与 Metso 公司(之前叫 Metso Outotec 公司)合作开发,是专为超细磨设计($P_{80}<8\ \mu\text{m}$)的高能搅拌技术。ALC 系列卧式 Isa 磨机在 2017 年由浙江艾领创矿业科技有限公司研发,这是中国自主研发的超细磨设备,打破了国外技术垄断^[92]。表 7 总结了国内外采用超细磨矿技术的一些工厂及工厂的相关信息^[57,92],超细磨矿技术在世界范围内得到了广泛应用。

4 种难处理金矿预处理技术的优缺点、适用矿物、环保性、综合成本等的综合对比结果如表 8 所示。4 种预处理技术各有特点和工业应用,需结合工艺矿

表 7 部分国内外采用超细磨矿技术的工厂^[57,92]

Table 7 Domestic and international factories utilizing ultrafine grinding technology^[57,92]

国家	矿名称	原料	粒度 (P_{80})/ μm	磨机
Burkina Faso	Semafo Boungou 金矿	金矿	<63	Vertimill®
Indonesia	Newcrest Gosowong 金矿	金矿	<30	Vertimill®
Australia	Cracow 金矿	金精矿	<25	HIGmill®
Peru	Tambomayo 金矿	金矿	<20	Vertimill®
Australia	KCGM 金矿	硫化金精矿	<12	IsaMill®
Australia	Sunrise Dam 金矿	硫化金精矿	<10	HIGmill®
Kazakhstan	Kazakhmys 金矿	金精矿	<10	Vertimill®
Kazakhstan	Aktogay 金矿	金精矿	<10	IsaMill®
Kyrgyzstan	Kumtor 金矿	金精矿	<10	IsaMill®
Mexico	Peñasquito 金矿	黄铁矿金精矿	<8	HIGmill®
New Zealand	Macraes 金矿	金精矿	<15	IsaMill®
中国	黑龙江多宝山铜矿	铜精矿	<25	ALC-1500L 磨机
中国	新疆阿舍勒铜锌矿	铜锌精矿	<25	ALC-3900L 磨机 (2.6 MW)

物学特性、金回收率、综合成本等因素进行考量和筛选。

表 8 难处理金矿预处理技术对比

Table 8 Comparison of pre-treatment technologies for refractory gold ores

技术名称	基本原理	优点	缺点	适用矿物	环保性	综合成本	典型应用案例
焙烧氧化法	高温焙烧分解硫化物,暴露金颗粒	技术成熟,适用性强;处理碳质金矿效果好	产生 SO ₂ 、As ₂ O ₃ 等有害气体;能耗高,环保压力大	含碳质、硫化物包裹的金矿(如碳质矿石型)	低(废气排放严重)	中(设备简单,但污染治理费用高)	湖南中南黄金冶炼厂(2006)、美国 Newmont 固化焙烧(1996)
加压氧化法	高温高压下氧化硫化物,释放包裹金	金回收率高;环境友好(砷稳定固定);可处理高硫矿	设备投资大,维护成本高;工艺复杂,需耐高压设备;不适用高碳矿	高硫、低碳难处理矿(如黄铁矿/毒砂型)	中高(砷稳定固定,但设备需耐腐蚀)	高(设备投资和运营成本高)	美国 McLaughlin 工厂(1985)、中国贵州水银洞金矿(2016)
生物氧化法	微生物氧化硫化物,破坏矿物结构	绿色环保(无废气);金回收率可达 80%~100%	预处理周期长(1~4 周);菌种适应性受限;酸性废水处理成本高	硫化物型金矿	高(无废气,但废水需处理)	中高(菌种培养和废水处理成本)	南非 Fairview 工厂(1986)、中国烟台黄金冶炼厂(2000)
超细磨矿法	超细磨矿 ($P_{80}<10\ \mu\text{m}$) 物理破碎,暴露金颗粒	无化学反应污染;适用于细粒包裹金矿	设备能耗高,介质磨损快;需结合化学氧化提升效率。	细粒包裹型金矿(如包裹体、碲化物型)	高(无化学污染,但能耗高)	中(设备能耗和介质磨损成本显著)	澳大利亚 Kalgoorlie 矿 (IsaMill™)、中国新疆某铜锌矿 (ALC 磨机)

5 结论与展望

本文系统综述了难处理金矿的 4 种预处理技术(焙烧氧化法、加压氧化法、生物氧化法、超细磨矿法)的研究进展及工业应用现状,得出以下结论。

1) 焙烧氧化法适合处理含硫含碳金矿,技术成熟、适用性强,但存在 SO₂ 和 As₂O₃ 等有害气体排放问题,环保压力限制了其大规模应用。通过两段焙烧、微波辅助等技术改进,可显著提升金回收率,但仍需解决污染控制和能耗优化问题。

2) 加压氧化法适合处理高硫低碳矿,在高温高压下高效氧化硫化物,金回收率高,且环境友好(砷以稳定形态固定)。但其设备投资高、工艺复杂,适用于处理高硫低碳矿。对硫化物氧化效果酸性条件优于碱性条件。

3) 生物氧化法适合处理硫化物型金矿,以微生物氧化硫化物,绿色环保(无废气排放),金回收率可达 80%~100%。但预处理周期长(1~4 周)、菌种适应性受限,且后续酸性废水处理成本高。硫脲浸出与生

物氧化结合可规避碳质“劫金”问题,为无氰工艺提供新思路。

4) 超细磨矿法适合处理细粒包裹型金矿,通过物理破碎(粒度 $P_{80}<10\ \mu\text{m}$)暴露包裹金,结合化学氧化(如常压弱酸)可将金回收率提升至95%以上。设备能耗高、介质磨损快是该方法的主要瓶颈。此外,国产化设备(如ALC磨机)的研发降低了对国外的技术依赖。

未来,随着环保法规趋于严格和低碳经济需求,难处理金矿预处理技术将向高效、清洁、智能化方向发展,为黄金资源可持续开发提供保障。技术方面,多技术协同工艺(如生物氧化+超细磨、微波焙烧+加压氧化)是预处理技术发展的方向,兼顾效率与环保性,降低综合处理成本。环保方面,需要推动研发低毒/无氰浸出剂(如硫脲、硫代硫酸盐)的生产应用落地,改良微生物菌种(耐高温、高砷适应性),减少污染物排放,强化砷、硫等副产物的资源化回收(如制备砷酸铁、硫酸),实现“零废”生产。设备方面,进一步优化超细磨设备能效比,引入人工智能系统,采用机器学习预测工艺参数,优化设备能耗等。

参考文献

- [1] ROBERTO F F. 16S-rRNA gene-targeted amplicon sequence analysis of an enargite-dominant bioleach demonstration in Peru[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 180: 271-276.
- [2] World Gold Council. Global annual gold demand and supply[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://www.gold.org/goldhub/data/gold-demand-by-country>.
- [3] XIN Z. Analysts see slower growth for 2025 gold market[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://www.chinadaily.com.cn/a/202502/05/WS67a2c4ffa310a2ab06eaa2f9.html>.
- [4] 产业研究报告网. 2025—2031年中国黄金行业前景研究与市场需求预测报告[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://www.chinairr.org/report/R01/R0107/202411/26-628011.html>. Industry Research Report Network. Research report on the prospect of China's gold industry and market demand forecast from 2025 to 2031[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://www.chinairr.org/report/R01/R0107/202411/26-628011.html>.
- [5] 中华人民共和国自然资源部. 中国矿产资源报告2024[EB/OL]. [2025-04-12]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202410/t20241022_2871217.html. Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. China mineral resources report 2024[EB/OL]. [2025-04-12]. https://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/kc_19263/zgkczybg/202410/t20241022_2871217.html.
- [6] 中国五矿. 五矿证券《USGS 2024年数据洞察》[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2025-03-12/doc-inepkvpc8620154.shtml>. China Minmetals. Minmetals securities "USGS 2024 data insights"[EB/OL]. [2025-04-12]. <https://finance.sina.com.cn/roll/2025-03-12/doc-inepkvpc8620154.shtml>.
- [7] The United States Geological Survey. Mineral commodity summaries 2025[EB/OL]. [2025-06-10]. <https://pubs.usgs.gov/publication/mcs2025>.
- [8] 中国黄金协会. 2024年黄金矿业技术大会[EB/OL]. [2025-06-10]. <https://www.cngold.org.cn/news/show-4704.html>. China Gold Association. 2024 gold mining technology conference[EB/OL]. [2025-06-10]. <https://www.cngold.org.cn/news/show-4704.html>.
- [9] 郭学益, 张磊, 田庆华, 等. 氧压渣非氰体系浸金及其机理[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(5): 1131-1141. GUO X Y, ZHANG L, TIAN Q H, et al. Gold leaching in oxygen-pressure slag non-cyanide system and its mechanism[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(5): 1131-1141.
- [10] 林海彬, 郭金溢, 谢洪珍, 等. 碳质高砷硫化物包裹多重难处理金矿热压氧化-氰化试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2024(10): 111-118. LIN H B, GUO J Y, XIE H Z, et al. Test on pressure oxidation-cyanidation of carbonaceous high-arsenic sulfide-encapsulated multi-refractory gold ore[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2024(10): 111-118.
- [11] FLEMING C. Hydrometallurgy of precious metals recovery[J]. *Hydrometallurgy*, 1992, 30(1/2/3): 127-162.
- [12] 谭巧义, 高立强, 贾先兵, 等. 某难处理金矿生物预氧化[J]. *有色金属工程*, 2024, 14(3): 63-69. TAN Q Y, GAO L Q, JIA X B, et al. Biological pre-oxidation of a refractory gold ore[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2024, 14(3): 63-69.
- [13] 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 ore[J]. *Gold*, 2021, 42(6): 60-68.
- [14] 宋鑫. 中国难处理金矿资源及其开发利用技术[J]. *黄金*, 2009, 30(7): 46-49. SONG X. Refractory gold ore resources in China and their development and utilization technologies[J]. *Gold*, 2009, 30(7): 46-49.
- [15] 张伟晓, 闫娟沙, 张济文. 国外某含砷难处理金矿提金工艺试验[J]. *有色金属(冶炼部分)*, 2019(4): 56-59. ZHANG W X, LV J S, ZHANG J W. Technological test on abroad arsenic bearing refractory gold mine[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2019(4): 56-59.
- [16] 罗星, 李尽善, 周卫宁, 等. 某金矿预处理后炭浸法提金试

- 验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(9): 28-30, 47.
- LUO X, LI J S, ZHOU W N, et al. Research on carbon-leaching of gold ore after pretreatment[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2016(9): 28-30, 47.
- [17] 张亦飞. 现代黄金冶炼技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- ZHANG Y F. *Modern gold refining technology*[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2014.
- [18] 余建文, 高鹏, 韩跃新, 等. 难浸金矿预处理方法的新进展[J]. 矿冶, 2013, 22(2): 59-62.
- YU J W, GAO P, HAN Y X, et al. New advances in pretreatment methods for refractory gold ore[J]. *Mining and Metallurgy*, 2013, 22(2): 59-62.
- [19] BARBOUCHI A, LOUARRAT M, MIKALI M, et al. Advancements in improving gold recovery from refractory gold ores/concentrates: a review[J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2024: 1-18. DOI: 10.1080/00084433.2024.2441548.
- [20] NANTHAAKUMAR B, PICKLES C, KELEBEK S. Microwave pretreatment of a double refractory gold ore[J]. *Minerals Engineering*, 2007, 20(11): 1109-1119.
- [21] 李峰, 王贤磊, 张辉, 等. 焙烧氧化处理对含金硫精矿工艺矿物学特性的影响研究[J]. 黄金, 2022, 43(1): 91-95.
- LI F, WANG X L, ZHANG H, et al. Effect of roasting oxidation treatment on process mineralogy characteristics of gold-bearing sulfur concentrate[J]. *Gold*, 2022, 43(1): 91-95.
- [22] 王力军. 难处理金矿石预处理技术综述[J]. 黄金, 2000, 21(1): 38-45.
- WANG L J. Review of pretreatment technologies for refractory gold ores[J]. *Gold*, 2000, 21(1): 38-45.
- [23] 郭持皓, 王云, 刘大学, 等. 难处理金矿短流程熔盐提金新工艺[J]. 有色金属(冶炼部分), 2016(3): 40-43.
- GUO C H, WANG Y, LIU D X, et al. A novel short-flow molten salt process for gold extraction from refractory gold ore[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2016(3): 40-43.
- [24] CHEN L, YANG T Z, LIU W F, et al. Developments of processing technologies for refractory gold ores[C]// *Proceeding of the 4th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing*, San Antonio, TX, United States. Cham: Springer, 2013: 545-551.
- [25] FRASER K S, WALTON R H, WELLS J A. Processing of refractory gold ores[J]. *Minerals Engineering*, 1991, 4(7/8/9/10/11): 1029-1041.
- [26] ZHANG Z H, LIU B L, JU J T, et al. Behavior of arsenic and aurum leaching by roasting arsenic gold ore[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 233: 644-647.
- [27] THOMAS K G, COLE A P. Roasting developments: especially oxygenated roasting[M]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2016: 373-392.
- [28] 雷占昌, 虞洁, 马红蕊. 难处理金矿预处理技术现状及进展[J]. 现代矿业, 2014, 30(5): 23-24, 33.
- LEI Z C, YU J, MA H R. Current status and progress of pretreatment technologies for refractory gold ores[J]. *Modern Mining*, 2014, 30(5): 23-24, 33.
- [29] 马方通, 高利坤, 董方, 等. 难处理金矿预处理及强化氧化技术研究现状及进展[J]. 黄金, 2016, 37(4): 51-55.
- MA F T, GAO L K, DONG F, et al. Research status and progress in pretreatment and intensified cyanidation technologies for refractory gold ores[J]. *Gold*, 2016, 37(4): 51-55.
- [30] 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. Current status and development trends of gold extraction from refractory gold ores[J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2015(4): 38-43.
- [31] 杨晓峰, 梁树丰, 潘凤娇. 高硫富砷金矿氧化预处理工艺研究现状[J]. 黄金, 2022, 43(2): 85-89.
- YANG X F, LIANG S F, PAN F J. Research status of oxidation pretreatment technologies for high-sulfur and arsenic-bearing gold ores[J]. *Gold*, 2022, 43(2): 85-89.
- [32] 刘汉钊. 国内外难处理金矿焙烧氧化现状和前景[J]. 国外金属矿选矿, 2005(7): 5-10.
- LIU H Z. Current status and prospects of roasting oxidation for refractory gold ores worldwide[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2005(7): 5-10.
- [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. Research status and progress of pretreatment processes for complex refractory gold ores[J]. *Gold*, 2020, 41(5): 65-72.
- [34] 曾祥荣. 非氰浸出剂—硫氰酸铵浸金工艺及机理研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2021.
- ZENG X R. Study on gold leaching process and mechanism with non-cyanide leaching agent and ammonium thiocyanate[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2021.
- [35] PEREA C G, RESTREPO J O. Use of amino acids for gold dissolution[J]. *Hydrometallurgy*, 2018, 177: 79-85.
- [36] QIN H, GUO X Y, TIAN Q H, et al. Recovery of gold from sulfide refractory gold ore: oxidation roasting pretreatment and gold extraction[J]. *Minerals Engineering*, 2021, 164: 106822. DOI: 10.1016/j.mineng.2021.106822.
- [37] LI H, LI Z H, JIN J Z, et al. Pore evolution in refractory gold ore formed by oxidation roasting and the effect on the cyanide leaching process[J]. *ACS Omega*, 2022, 7(4): 3618-3625.
- [38] HAAPID A, ZULLAIKAH S, KAWIGRAH A, et al. Oxidation of sulfide mineral and metal extraction analysis in the microwave-assisted roasting pretreatment of refractory gold ore[J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2024, 17(1): 105447. DOI: 10.1016/j.arabjc.2023.105447.

- [39] THOMAS K G, PEARSON M S. Pressure oxidation overview[M]. Amsterdam: Elsevier B.V., 2016: 341-358.
- [40] 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. Current status and prospects of pressure leaching technology for rare and precious metals[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6): 1-9.
- [41] MCDONALD R, MUIR D. Pressure oxidation leaching of chalcopyrite: part II: comparison of medium temperature kinetics and products and effect of chloride ion[J]. Hydrometallurgy, 2007, 86(3/4): 206-220.
- [42] MCDONALD R, MUIR D. Pressure oxidation leaching of chalcopyrite: part I: comparison of high and low temperature reaction kinetics and products[J]. Hydrometallurgy, 2007, 86(3/4): 191-205.
- [43] PAPANGELAKIS V, DEMOPOULOS G. Acid pressure oxidation of arsenopyrite: part I: reaction chemistry[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1990, 29(1): 1-12.
- [44] PAPANGELAKIS V, DEMOPOULOS G. Acid pressure oxidation of arsenopyrite: part II: reaction kinetics[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1990, 29(1): 13-20.
- [45] PAK K S, ZHANG T A, KIM C S, et al. Research on chlorination leaching of pressure-oxidized refractory gold concentrate[J]. Hydrometallurgy, 2020, 194: 105325. DOI: 10.1016/j.hydromet.2020.105325.
- [46] ZHANG L, GUO X Y, TIAN Q H, 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. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105743.
- [47] CIGAN B. Lead-zinc-tin'80: proceedings of a world symposium on metallurgy and environmental control[C]//TMS-AIME 109th Annual Meeting, Las Vegas, NV, United States. New York: The Metallurgical Society of AIME, 1979.
- [48] FLEMING C A. Basic iron sulfate: a potential killer in the processing of refractory gold concentrates by pressure oxidation[J]. Mining, Metallurgy & Exploration, 2010, 27(2): 81-88.
- [49] 张磊. 卡林型金精矿加压氧化预处理及高效提金研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
ZHANG L. Study on pressure oxidation pretreatment and efficient gold extraction for Carlin-type gold concentrate [D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [50] WU J, AHN J, LEE J. Gold department and leaching study from a pressure oxidation residue of chalcopyrite concentrate[J]. Hydrometallurgy, 2021, 201(1/2): 105583. DOI: 10.1016/j.hydromet.2021.105583.
- [51] HISKEY J B, SANCHEZ V M. Alkaline pressure oxidation of a gold-bearing arsenopyrite concentrate[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 1995, 15(1/2/3/4): 61-74.
- [52] 蔡创开. 难处理金矿加压预氧化扩大连续试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(6): 66-71.
CAI C K. Pilot-scale continuous test on pressure pre-oxidation of refractory gold ore[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(6): 66-71.
- [53] 阮书锋. 高砷锑金精矿矿浆电解渣热解分离砷、硫工艺及机理研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2022.
RUAN S F. Study on process and mechanism of arsenic and sulfur separation by pyrolysis of slurry electrolysis residue from high-arsenic antimony gold concentrate[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2022.
- [54] LEE S, SADRI F, GHAREMAN A. Enhanced gold recovery from alkaline pressure oxidized refractory gold ore after its mechanical activation followed by thiosulfate leaching[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2022, 8(1): 1-11.
- [55] BODUEN A, ZALESOV M, MELAMUD V, et al. Combined bacterial and pressure oxidation for processing high-sulfur refractory gold concentrate[J]. Processes, 2023, 11(11): 3062. DOI: 10.3390/pr11113062.
- [56] LEMOS F D A, NASCIMENTO M, MOREIRA JUNIOR G R, et al. Recovery of gold from refractory ore employing pressure oxidation[J]. REM, International Engineering Journal, 2025, 78: 230116. DOI: 10.1590/0370-44672023780116.
- [57] SURIMBAYEV B, AKCIL A, BOLOTOVA L, et al. Processing of refractory gold-bearing sulfide concentrates: a review[J]. Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review, 2024, 45(6): 573-591.
- [58] 谭希发. 难处理金矿的热压氧化预处理技术[J]. 有色金属(冶炼部分), 2012(9): 38-43.
TAN X F. Pressure oxidation pretreatment technology on refractory gold ores[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2012(9): 38-43.
- [59] SOTO-URIBE J C, VALENZUELA-GARCIA J L, SALAZAR-CAMPOY M M, et al. Gold extraction from a refractory sulfide concentrate by simultaneous pressure leaching/oxidation[J]. Minerals, 2023, 13(1): 116. DOI: 10.3390/min13010116.
- [60] GHASEMZADEH H, PASAND M S, SHAMSI M M. Experimental study of sulfuric acid effects on hydromechanical properties of oxide copper heap soils[J]. Minerals Engineering, 2018, 117: 100-107.
- [61] PAN W, YANG L R, JIN H M, et al. Experimental study on microbial desulfurization of sulfide ores and self-heating simulation of ore heaps under ultrasonic and microwave[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 164: 435-448.
- [62] NATARAJAN K A. Biotechnology for environmentally benign gold production[J]. Horizons in Bioprocess Engineering, 2019: 263-299. DOI: 10.1007/978-3-030-29069-6_14.

- [63] 马方通, 高利坤, 董方, 等. 难处理金矿预处理及强化氰化技术研究现状及进展[J]. 黄金, 2016, 37(4): 51-55.
MA F T, GAO L K, DONG F, et al. Research status and progress of pretreatment and enhanced cyanidation technology for refractory gold ore[J]. Gold, 2016, 37(4): 51-55.
- [64] MCNEICE J, MARZOUGH I O, KIM R et al. Gold extraction from refractory sulfide gold concentrates: a comparison of bio-oxidation and neutral atmospheric pre-treatment and economic implications[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2021, 7(3): 1354-1367.
- [65] LAESSON L, OLSSON G, HOLST O, et al. Pyrite oxidation by thermophilic archaeobacteria[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1990, 56(3): 697-701.
- [66] FOWLER T, HOLMES P, CRUNDWELL F. On the kinetics and mechanism of the dissolution of pyrite in the presence of *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Hydrometallurgy, 2001, 59(2/3): 257-270.
- [67] SAND W. (Bio) chemistry of bacterial leaching-direct vs indirect bioleaching[J]. Hydrometallurgy, 1999, 51: 115-129.
- [68] 黄中省. 难处理金精矿连续生物氧化及废水废渣综合处理研究[D]. 长沙: 中南大学, 2022.
HUANG Z S. Research on continuous biological oxidation of refractory concentrate and comprehensive treatment of wastewater and waste sludge[D]. Changsha: Central South University, 2022.
- [69] HUANG T, LI D W. Presentation on mechanisms and applications of chalcopyrite and pyrite bioleaching in biohydrometallurgy: a presentation[J]. Biotechnology Reports, 2014, 4: 107-119.
- [70] MUBAROK M, WINARKO R, CHAERUN S, et al. Improving gold recovery from refractory gold ores through bio-oxidation using iron-sulfur-oxidizing/sulfur-oxidizing mixotrophic bacteria[J]. Hydrometallurgy, 2017, 168: 69-75.
- [71] SASAKI K, SUYAMA I, TAKIMOTO R, et al. Completed extraction and recovery of gold from double refractory gold ores by thiourea after bio-oxidation of sulfides by mixed cultures[C]//Proceedings of the 63rd Annual Conference of Metallurgists (COM 2024), Vancouver, BC, Canada. Cham: Springer, 2024.
- [72] JOHNSON, BARRIE D. Biomining-biotechnologies for extracting and recovering metals from ores and waste materials[J]. Current Opinion in Biotechnology, 2014, 30C: 24-31.
- [73] 王健, 王芳. 生物氧化工艺在黄金工业生产中的发展与应
用[J]. 内蒙古科技与经济, 2021(14): 93-94, 96.
WANG J, WANG F, et al. Development and application of bio-oxidation process in gold industry production[J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2021(14): 93-94, 96.
- [74] 黄海辉. 难处理金矿细菌氧化的工业应用及发展方向[J]. 矿冶, 2008, 17(2): 63-67, 83.
HUANG H H. Industrial application and development direction of bacterial oxidation for refractory gold ores[J]. Mining and Metallurgy, 2008, 17(2): 63-67, 83.
- [75] 高金昌. 生物冶金技术在黄金工业生产中的应用现状及发展趋势[J]. 黄金, 2008, 29(10): 36-45.
GAO J C. Application status and development trend of bio-metallurgical technology in gold industry production[J]. Gold, 2008, 29(10): 36-45.
- [76] WATLING H R. The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides: a review[J]. Hydrometallurgy, 2006, 84(1/2): 81-108.
- [77] 杨洪英, 杨立. 细菌冶金学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
YANG H Y, YANG L. Microbial metallurgy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [78] 李佳峰. 低品位难处理金矿生物堆浸氧化基础理论及工艺研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2021.
LI J F. Research on the basic theory and process of biological heap leaching oxidation for low-grade and refractory gold ore[D]. Shenyang: Northeastern University, 2021.
- [79] SPENCER P A. Influence of bacterial culture selection on the operation of a plant treating refractory gold ore[J]. International Journal of Mineral Processing, 2001, 62(1/2/3/4): 217-229.
- [80] ARRASCUE M E L, NIEKERK J V. Bio-oxidation of arsenopyrite concentrate using BIOX process: industrial experience in Tamboraque, Peru[J]. Hydrometallurgy, 2006, 83(1/2/3/4): 90-96.
- [81] NEALE J, PINCHES A, DEEPPLAUL V. Mintek-BacTech's bacterial-oxidation technology for refractory gold concentrates: beaconsfield and beyond[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2000, 100(7): 415-421.
- [82] PENG J B, YAN W M, BAO X Z. Expression of heterogenous arsenic resistance genes in the obligately autotrophic biomining bacterium *Thiobacillus ferrooxidans*[J]. Applied and Environmental Microbiology, 1994, 60(7): 2653-2656.
- [83] BRIERLEY C L, BRIERLEY J A. Progress in bioleaching: part B: applications of microbial processes by the minerals industries[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(17): 7543-7552.
- [84] 杨显万, 沈庆峰, 郭玉霞. 微生物湿法冶金[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2003.
YANG X W, SHEN Q F, GUO Y X. Microbial hydrometallurgy[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2003.
- [85] 张国旺, 黄圣生, 李自强, 等. 超细搅拌磨机的研究现状和发展[J]. 有色矿冶, 2006, 22(增刊1): 123-125, 127.

- ZHANG G W, HUANG S S, LI Z Q, et al. Research status and development of ultrafine grinding mills[J]. *Nonferrous Metals Processing and Metallurgy*, 2006, 22(Suppl.1): 123-125, 127.
- [86] 王志江, 李丽, 刘亚川. 超细磨技术在难处理金矿中的应用[J]. *黄金*, 2014, 35(6): 54-57.
- WANG Z J, LI L, LIU Y C. Application of ultrafine grinding technology in refractory gold ore[J]. *Gold*, 2014, 35(6): 54-57.
- [87] 崔瑞, 李茂林, 王光辉. 国内外矿用搅拌磨的应用及研究现状[J]. *矿山机械*, 2012, 40(12): 4-10.
- CUI R, LI M L, WANG G H. Application and research status of mine-used mixing mills at home and abroad[J]. *Mining Machinery*, 2012, 40(12): 4-10.
- [88] A·K·安尼马杜, 李长根, 雨田. 超细磨技术在南非英美铂业集团公司的开发应用[J]. *国外金属矿选矿*, 2007(6): 11-15, 38.
- ANIMADOU A K, LI C G, YU T. Development and application of ultrafine grinding technology in Anglo American Platinum Group Company of South Africa[J]. *Metallic Ore Dressing Abroad*, 2007(6): 11-15, 38.
- [89] GOMEZ SANTIAGO M, MARTINEZ-PONCE M Á, ORTIZ LARA N, et al. Ultrafine grinding of a refractory ore and its effect on the gold and silver leaching[J]. *MRS Advances*, 2025, 10(7): 868-873.
- [90] 蔡创开. 某高硫难处理金精矿超细磨提金试验研究[J]. *矿冶工程*, 2020, 40(6): 108-110.
- CAI C K. Experimental study on gold extraction from high-sulfur refractory gold concentrate by ultra-fine grinding[J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2020, 40(6): 108-110.
- [91] 杨建伟. 甘肃陇南某金矿金精矿超细磨浸出试验研究[J]. *新疆有色金属*, 2022, 45(2): 45-47.
- YANG J W. Experimental study on ultrafine grinding and leaching of gold concentrate from a gold mine in Longnan, Gansu province[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, 2022, 45(2): 45-47.
- [92] 许新跃, 童伟, 黄东福, 等. 艾砂磨机在细磨中的优势及其在有色金属选矿厂的应用[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2020(5): 86-90.
- XU X Y, TONG W, HUANG D F, et al. The advantage of ALC Mill in fine grinding and application in nonferrous metal concentrator[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2020(5): 86-90.

Research Progress and Industrial Application Status of Pretreatment Technologies for Refractory Gold Ores

ZHU Xingfu¹, ZHONG Shouguo², XU Chao¹, DONG Zhonglin², LI Guangsheng¹, WU Jintian²,
YANG Xinhua¹, JIANG Tao², XU Bin²

(1. Metallurgical Laboratory Branch of Shandong Gold Mining Technology Co., Ltd., Yantai 261441, Shandong, China;

2. School of Minerals Processing and Bioengineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: With the depletion of easily extractable gold resources, refractory gold ores have become the main source of gold production, especially in China, where they account for over 60% of total gold reserves. This study aims to comprehensively review the principles, technical progress, and industrial application status of four major pretreatment technologies for refractory gold ores—namely, roasting oxidation, pressure oxidation (POX), bio-oxidation, and ultrafine grinding—with the goal of identifying key developments, performance characteristics, and future directions. Roasting oxidation is found to be a mature and widely applied technology for sulfide- and carbon-bearing ores. It thermally decomposes encapsulating sulfides and carbonaceous materials at high temperatures, thereby increasing gold exposure and enhancing cyanide leaching. However, its environmental drawbacks—particularly the emission of SO₂ and As₂O₃—pose significant challenges for large-scale adoption. Advanced variants such as two-stage roasting, fluidized bed systems, and microwave-assisted roasting have been explored to improve energy efficiency and reduce pollution. POX is applied under high-temperature and high-pressure conditions, typically in acidic environments, to oxidize sulfide minerals such as pyrite and arsenopyrite. The technology achieves high gold recovery rates and immobilized arsenic as environmentally stable compounds. However, its high capital cost, complex equipment requirements, and poor adaptability to high-carbon ores limit broader application. Industrial plants in the U.S., Brazil, Russia, and China (e.g., the Shuiyindong POX

plant in Guizhou province) have demonstrated successful implementation with capacities exceeding 2 000 t/d. Bio-oxidation utilizes acidophilic bacteria to oxidize sulfide minerals in gold ores. It offers environmental advantages by avoiding toxic gas emissions and shows promising recovery rates (80%—100%) in sulfide-rich ores. Nevertheless, the method is constrained by long pretreatment cycles (one to four weeks), limited microbial adaptability, and the need for costly wastewater treatment. Emerging hybrid strategies such as BIOX[®] + thiourea leaching and the use of engineered thermophilic strains have demonstrated improved efficiency and lower environmental impact. Ultrafine grinding is particularly effective for finely disseminated ores. It physically liberates submicron gold particles by reducing ore particle size to $P_{80} < 10 \mu\text{m}$. While this method alone can significantly enhance gold recovery, its effectiveness is further improved when combined with oxidative leaching techniques. The high energy consumption and wear of grinding media remain as key cost factors. Various industrial-scale applications (e.g., IsaMill[®], HIGmill[®], and China's ALC mills) have validated its performance globally. Comparative analysis indicates that each pretreatment technology has specific advantages and limitations. Roasting is technically robust but environmentally constrained; POX delivers high recovery but involves high costs and engineering complexity; bio-oxidation is environmentally benign but requires long residence times; and ultrafine grinding offers mechanical liberation but at high operational costs. The selection of an appropriate pretreatment process must consider ore mineralogy, environmental constraints, capital investment, and expected recovery performance. Future developments are expected to focus on hybrid pretreatment processes (e.g., bio-oxidation+ultrafine grinding, microwave roasting+POX), cleaner leaching reagents (e.g., thiosulfate, thiourea), microbial strain optimization, and intelligent equipment systems. The integration of green, cost-effective, and high-efficiency pretreatment technologies are essential to support the sustainable development of refractory gold resources in the context of increasingly stringent environmental regulations and the global push toward low-carbon metallurgy.

Key words: refractory gold ores; roasting oxidation method; pressure oxidation method; bio-oxidation method; ultrafine grinding method; industrial application