



## 我国金矿资源概况及选冶技术研究进展

邱曼<sup>1</sup>, 黄学雄<sup>2</sup>, 毛益林<sup>3</sup>, 曾小波<sup>3</sup>

(1. 新疆生产建设兵团地质勘查测绘中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 新疆生产建设兵团自然资源局, 新疆 乌鲁木齐 830002; 3. 中国地质科学院矿产综合利用研究所, 中国地质调查局金属矿产资源综合利用技术研究中心, 四川 成都 610041)

**摘要:** 我国金矿资源主要集中在山东、甘肃、新疆、内蒙古、河南和云南等 6 省区, 主要为砂金、岩金和伴生金 3 种类型。我国金矿资源丰富, 是世界上最大的黄金生产国、消费国和进口国, 但对外依存度较高, 金消费大量依赖进口。加强国内金矿资源选冶技术攻关, 实现其高效、合理开发, 是保障金矿资源安全的重要举措。本文介绍了国内外金矿资源分布及概况, 综述了金矿选矿工艺及选矿药剂研究现状、难处理金矿预处理工艺研究现状及湿法浸出工艺研究现状, 阐述了金矿选冶技术的显著特点, 以及其优点和局限性, 展望了无氰浸出工艺和绿色高效的无氰浸出药剂将是难处理金矿石绿色提金的发展方向, 为提金技术的进一步研究及应用提供参考借鉴。

**关键词:** 金矿; 选矿工艺; 预处理工艺; 湿法浸出; 无氰工艺

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.02.019

中图分类号: TD982 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 02-0106-10

金 (Au) 资源作为重要战略资源的一种, 除了具有金融、货币和商品属性之外, 还广泛应用于仪器仪表制造、电子工业、医疗、化工设备、通信、航天等行业, 在全球经济发展中有着十分重要的作用。中国金矿资源储量丰富, 已有几百年的金矿开采历史<sup>[1-2]</sup>。截止 2020 年, 中国金矿储量 1927.37 t<sup>[3]</sup>。2021 年, 中国黄金产量为 370 t, 占全年全球黄金总产量 (3000 t 左右) 的 12% 以上, 连续 14 年成为全球第一黄金生产国。

世界金矿资源分布非常广泛, 遍布六大洲, 但是不均匀, 主要分布于美洲、大洋洲及非洲<sup>[4]</sup>。我国金矿资源具有规模较小, 主要以中小型为主, 占到了全国金矿的 90%, 但在储量上只占到了 48%, 无法与国外的金矿规模相比较; 金矿资源种类不多、资源利用率低, 造成了金矿资源的严重浪费, 影响了金矿资源战略意义的实现; 金矿矿石的质量处于中等, 一般质量较低的矿石大

都出产于大型矿床, 质量较高的矿石多出产于小型、中型的矿床<sup>[5]</sup>。本文总结了金矿资源类型及分布区域, 重点阐述了我国金矿选冶工艺、药剂及综合利用现状, 并对金矿资源的高效、合理开发利用进行了展望。

### 1 国内外金矿资源概况

全球金矿储量主要集中在澳大利亚 (占世界总储量的 17.82%)、南非 (占 10.91%)、俄罗斯 (占 9.09%)、智利 (占 7.09%)、美国和印尼 (各占 5.45%) 等国家, 六国储量合计占世界总量的 55.81%; 中国仅占 3.50%<sup>[6]</sup>。

我国金矿资源较丰富, 已查明矿区 3172 个。中国金矿资源开发利用程度较高, 已开发利用矿区占总矿区的 75%, 且近几年开发利用程度逐渐加强, 金矿生产出现平稳、比较快速的增长趋势。

历年来我国金矿产量见图 1。

收稿日期: 2022-08-25

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项“新疆乌恰县萨瓦亚尔顿高砷高铋金矿选冶关键技术研究 (2022B03016)”

作者简介: 邱曼 (1981-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事矿产规划、地质灾害调查及 GIS 等方面工作。

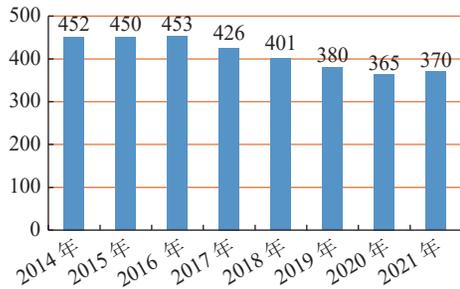


图1 历年我国黄金产量/t

Fig.1 China's gold production in past years

## 2 中国金矿资源类型及分布

我国查明资源储量主要分布在山东、甘肃、新疆、内蒙古、河南和云南等省区，6省区查明资源储量之和占全国的58.1%<sup>[7]</sup>。

### 2.1 我国金矿资源类型

金矿按照成因划分类型，可分为内生矿床、外生矿床两种类型。内生矿床指地球内部热能导致的矿床形成，包括岩浆成矿和热液成矿（如卡林型金矿、火山一次火山热液型），其中热液成矿有中温热液矿床中的石英脉型（山东玲珑金矿床）和蚀变岩型（山东焦家、新城金矿），蚀变岩型包括破碎带蚀变岩以及构造蚀变岩等。外生矿床可包括风化矿床（铁帽型）和沉积矿床（砂金）。金矿资源主要产于热液成矿作用，占据金矿总储量的九成<sup>[7]</sup>。

金矿按照资源结构化分类型，可分为岩金、砂金、伴生金三种类型。砂金是指山体中的岩金被河水冲刷、金与石英矿脉分离而成的金。因这类金多细微如砂，故称作砂金。砂金容易开采，作为黄金矿产资源的重要组成部分，历史上其产量长期居于领导地位；岩金又叫矿金，也称合质金，产于矿山，大都是随地下涌出的热泉通过岩石的缝隙而沉淀积成，常与石英夹在岩石的缝隙中。岩金开采的工序相对复杂而艰辛，一般开采出来一吨矿石，才能提炼出几克黄金，代表性矿床有新疆萨瓦亚尔顿金矿、山东焦家金矿等<sup>[8]</sup>；伴生金主要在有色金属、贵金属等矿床中伴生产出，尤其伴生于富硫化物、砷化物的有色金属矿床中，代表性矿床有西藏驱龙超大型铜金矿床伴生金28 t、墨竹工卡甲玛铜多金属矿伴生金75 t<sup>[9-10]</sup>。

### 2.2 我国金矿资源分布

我国金矿资源分布广泛，除却个别省（区、

市），均有金矿资源产出。金矿资源地区分布不均衡，基本呈现东部金矿储存面积大、种类多样的特点。我国大陆三个巨型深断裂体系决定了岩金矿的分布形势，其中，伴（共）生金主要参与长江中下游有色金属区域。大致分布形势表现为，东部金矿储量/资源量占到31.6%，中部金矿储量/资源量占到30.7%，西部金矿储量/资源量占到37.7%。

同时，我国金矿资源以岩金为主，伴生金较多；大规模金矿少，中小型较多；开采条件差，能露采的矿床少。

我国金矿资源按照矿集区化分主要以下六大矿集区：

#### 1、胶东金矿矿集区

胶东金矿矿集区是世界第三大金矿区，位于胶东半岛和辽东半岛地质断层区，目前探明黄金储量达4000 t，占全国总量的30%。中国十大金矿里胶东金矿矿集区独占5个，分别为招远金矿、三山岛金矿、新城金矿、夏甸金矿和焦家金矿<sup>[8]</sup>。

#### 2、冈底斯-拉萨金矿矿集区

该区金矿多是沿着河床分布，其中以班公湖-怒江缝合带、雅鲁藏布江缝合带之间最多。初步探明的黄金储量为120多t，预估储量在500 t以上。而且集区内成矿条件优越，但因海拔高、地理环境复杂及勘察程度低，存在大量空白区域，开采潜力巨大。

#### 3、滇黔桂金矿矿集区

该区位于贵州、云南和广西三省交界处，是全世界最集中的卡林型金矿的聚集地。代表矿床是位于贵州贞丰县沙坪乡的烂泥沟金矿，是黔东南州规模最大的金矿，也是世界级的特大型金矿。

#### 4、西秦岭金矿矿集区

该区是我国西北最大的金矿集区，位于陕西、甘肃、四川交界处。区内金矿多位于地下400 m左右的花岗岩地带中，尤其是在天水李子园-两当太阳寺一带，以及礼县、夏河县一带金矿分布较集中。其中甘肃文县的阳山金矿，累计探获黄金资源量308 t。

#### 5、燕辽金矿矿集区

该区位于河北北部、辽宁西部和内蒙古东南部，目前已经探明该区域，有17个大中型金矿床和5个金矿集中区。其中大部分沿张家口-北京-昌黎一带分布，此区域内的5个金矿区储量均超过

20 t。具有代表性的包括宣化、石湖、都山、赤峰以南以及敖汉地区。此外,吉林省的夹皮沟一带,也属于燕辽金矿集区,该区域金矿多数为岩金。其中都山金矿集中区,有着金厂峪、牛心山、峪耳崖等著名的大中型金矿,位于内蒙古包头市西北的长山壕金矿,是中国最大的露天金矿。

#### 6、小秦岭-熊耳山金矿集区

陕西的洛南县、潼关县和河南灵宝都是我国主要产金地,该区金矿资源主要沿小秦岭、崤山、熊耳山一带分布。作为我国第二大黄金产区,共发现金矿床 163 处,潜在储量达到了 2400 t。

### 2.3 新疆金矿资源分布

据新疆维吾尔自治区矿产资源总体规划(2021~2025 年)数据,新疆金矿查明资源储量居全国第 6 位,查清新疆金矿等战略性矿产资源禀赋,能有效支撑以新疆、甘肃为代表的国家西部战略性矿产资源综合利用及技术经济评价,保障能源资源安全。

区内金矿成群成带分布,主要集中于北疆的阿尔泰、准噶尔、西天山、东天山、北山等成矿带,以及南疆的屈库勒克地区;主要成矿类型为破碎带蚀变岩型、浅变质碎屑岩型、热液型、火山岩型;金矿品位总体较低,富矿少。

截止 2015 年底,新疆共发现各类金矿床(点) 500 余处,其中超大型 1 处、大型 12 处、中型 21 处、小型 79 处。金矿查明资源储量从 2007 年底的 87 t(全国第 21 位)跃升到 2015 年底的 728 t(全国第 3 位),为新疆黄金产量翻番提供了资源保障<sup>[11-13]</sup>。

## 3 金矿选矿工艺及药剂研究现状

我国金矿选矿主要基于矿石性质来选择合适的回收工艺,如砂金主要采用重选工艺回收金矿物,岩金根据载体矿物及含硫矿物多少可选择浮选工艺、重选工艺或联合回收工艺,伴生金因主要伴生于富硫化物、砷化物的有色金属矿床中,多采用浮选工艺或以浮选为主的联合工艺回收金矿物。

### 3.1 选矿工艺研究现状

#### (1) 重选法

重选主要用于处理金矿物与脉石密度差较大

的矿石,它是砂金提取金的传统选矿方法。重选具有不消耗药剂,环境污染小,设备结构简单,处理粗、中粒矿石处理能力大,能耗低等优点;其缺点是对微细粒矿石的处理能力小,分选效率低。

国内外利用重选法回收含金矿石的主要设备有跳汰机、溜槽、离心选矿机、摇床、尼尔森等,重选在黄金选矿中多是辅助工艺,适合回收粗粒金<sup>[14-16]</sup>。

朱一民等<sup>[17]</sup>针对内蒙古某金矿石,在磨矿细度为-0.043 mm 87%、分选 G 值为 80 G、流态化水量为 3 L/min、给矿浓度为 50% 的条件下,采用 1 粗 2 扫工艺流程进行尼尔森重选,混合精矿金回收率达 55.91%、金品位为 35.48 g/t,重选尾矿含金 1.34 g/t。

吕良等<sup>[18]</sup>针对非洲某氧化型金矿采用重选—浸出工艺,获得了较好指标:金总回收率达到 96.60%,其中尼尔森重选可获得金品位 129.82 g/t、金回收率 62.03% 的精矿;重选尾矿经环保浸出剂浸出,尾矿金品位降至 0.12 g/t,金浸出率 34.58%。

#### (2) 浮选法

由于载金矿物可浮性良好,因此浮选是大多数岩金矿山或伴生金矿山回收含金矿物常用的工艺。在原生金矿床中,金常与黄铁矿、方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、毒砂等硫化矿物共生,这些矿物都属于易浮矿物,并能形成稳定的矿化泡沫,是金最理想的载体矿物。浮选可以最大限度地使金富集到硫化物精矿中,然后送到冶炼厂冶炼<sup>[19-20]</sup>。近年来,我国浮选的技术越来越纯熟,调查显示硫化矿金浮选回收率为 90%~97%,氧化矿金的回收率为 75%~85%。

选金使用的浮选设备主要是吸气搅拌式浮选机和充气搅拌式浮选机。一般来说,中小型的选矿厂,充气量不大,就选择吸气搅拌式浮选机或者配备了吸浆槽的充气浮选机;大型选金矿厂选择充气搅拌式浮选机。吸气搅拌式浮选机有 SF 型浮选机、BF 型浮选机等,充气搅拌式浮选机有 KYF 型浮选机、XCF 型浮选机等。

汤亦婧等<sup>[21]</sup>针对辽宁某金矿,采用分段浮选工艺,在磨矿细度为-0.074 mm 90% 的条件下,以异戊基黄药+BK903G 组合作为捕收剂,获得了金品位分别为 125.96 g/t、14.86 g/t,金回收率分别为 80.86%、10.87% 两个金精矿产品,总的金精矿

品位为 66.80 g/t，金回收率为 91.73%，选矿指标明显高于常规浮选工艺。

### (3) 联合工艺法

我国金矿资源多呈“贫、细、杂”特点，矿物组成复杂，嵌布粒度粗细不均，赋存形态不一，导致采用单一重选或浮选工艺无法有效回收含金矿物，需要采用重选-浮选联合工艺或者浮选-重选联合工艺梯次回收。通常情况下，如果金矿物嵌布粒度不均考虑先采用重选工艺回收粒度较粗的金矿物，重选尾矿再进行磨矿，使金进一步单体解离，再采用浮选工艺回收细粒金；由于金暴露的表面积增大，可以与浮选药剂充分作用，有效提高金的回收率。

陈广等<sup>[22]</sup>针对绵阳某以单体-连生体以及铁等氧化物包裹金形式存在的含金尾矿，采用浮-重选联合流程，获得产率为 3.06%，金品位为 12.7 g/t，回收率为 48.52% 的浮选精矿，同时获得产率为 2.82%，金品位为 4.54 g/t，回收率为 16.02% 的摇床精矿，为综合回收该尾矿中的金提供了技术依据。

毛益林等<sup>[23]</sup>针对四川某石英脉型金矿，采用重选-浮选-磁选联合流程，梯次回收粗粒自然金、细粒含金矿物与伴生于黄铁矿、磁黄铁矿中金矿物，获得金精矿产率 5.83%、金品位 82.76 g/t、回收率 94.47% 的综合选矿指标。

## 3.2 选矿药剂研究现状

选矿药剂主要指浮选药剂，其在浮选中起着至关重要的作用。用来调节和控制浮选的过程，削弱或者改善物料的可浮性，以便脉石与矿石分离，达到去除杂质或者提取有用矿粒的目的。浮选药剂可分三大类：捕收剂，抑制剂，活化剂。

### (1) 捕收剂

捕收剂主要起改变含金矿物疏水性的作用（使矿物不被水浸湿）。自然界中除少数矿物表面疏水，具有天然可浮性之外，大多数矿物都是亲水的，捕收剂可使这些矿物产生疏水使之可浮。捕收剂在浮选中常用的有煤油、油酸、黄药等。

常见的捕收剂有：巯基阴离子型捕收剂（黄药、黑药、乙硫氮）、硫代酯类捕收剂（硫代氨基甲酸酯、黄原酸酯、硫氮酯类等）、螯合捕收剂（肟基磷酸酯化合物、HTA 等）、组合捕收剂以及各种新型高效捕收剂。黄药类捕收剂在载金矿物的浮选工艺中因其捕收能力强，所以使用范围最广，黄药碳链越长捕收能力越强，选择性越

差；黑药虽然捕收能力相对较弱，但用量少，具有起泡性<sup>[24]</sup>。

### (2) 抑制剂

抑制剂主要是提高脉石矿物的亲水性和阻止脉石矿物同捕收剂作用，使其可浮性受到抑制。如在浮选过程中使用硅酸钠抑制硅酸盐矿物，达到含金矿物与硅酸盐脉石矿物分离的目的。

金矿浮选常用的抑制剂有：石灰、氧化剂型抑制剂（高锰酸钾、双氧水、二氧化锰、漂白粉、过氧二硫酸钾、次氯酸钠、重铬酸钾）、碳酸盐型抑制剂（碳酸钠、碳酸锌）、硫氧化物类抑制剂（亚硫酸钠、硫代硫酸盐、过氧二硫酸钾）、有机抑制剂（糊精、腐植酸钠、聚丙烯酰胺、木质素磺酸盐）<sup>[25]</sup>。

### (3) 活化剂

活化剂主要起到增强矿物和捕收剂的作用力，从而使难浮物浮起。常见的活化剂有碱性金属盐，当其溶于水溶液中时金属阳离子可以吸附在金矿物表面改变矿物的表面特性，从而提高金矿物的可浮性、改善捕收剂的选择性。比如，使用硫化钠活化含金的铅铜氧化矿，使用硫酸铜或者铵盐活化含金的硫化物，然后用黄药等捕收剂浮选。

金矿浮选常用的活化剂有：硫酸铜、硫酸铵、氯化铵、硫化钠、硫化钾等。

## 4 难处理金矿预处理工艺研究现状

难处理金矿一般指含碳、砷、硫的金矿。难处理金矿中高碳、高硫、高砷类金矿特点是金微粒被包裹于硫化物中，在金的浸出过程中，炭质会吸附浸出液中与氰化物结合的金，出现“劫金”现象，使金的浸出率、回收率降低，造成金的损失；而高硫、高砷类金矿中含金矿物与硫化物关系非常密切，金往往以微细粒状态被包裹，或存在于毒砂或黄铁矿的单个晶体之间，有时硫化物还会生成黑色或黑褐色的表面膜覆盖在金的表面，影响金的氰化浸出<sup>[26-27]</sup>。

近年来，国内外对含碳高砷高硫等难处理金矿的预处理工艺技术开展了广泛而深入的研究，目的都是使砷黄铁矿、黄铁矿等 Au 的包裹体充分解离，让金裸露出来，从而提高金的浸出率，主要有以下几种工艺。

#### 4.1 焙烧氧化预处理

焙烧氧化法是通过焙烧使矿石中包裹金的硫化矿物氧化为氧化物或硫酸盐,同时除去含有的有机碳。焙烧氧化法除砷是通过浮选精矿进行焙烧,破坏包裹金的组织使金裸露,从而大幅度提高金的氰化浸出率的一种有效方法。

传统的焙烧氧化法具有处理速度快,适应性强(对含硫砷碳的难浸金矿石均适应),技术可靠,操作简便,副产品可回收利用等优点。缺点是对操作参数和给料成分变化比较敏感,容易造成过烧或欠烧,从而导致金的浸出率下降;焙烧过程中会释放出大量的 $\text{SO}_2$ 等有害气体,从焙烧过程中去除有害气体的费用较高,如综合回收不及时,会严重污染环境。

焙烧氧化预处理工艺分为普通焙烧氧化预处理与微波焙烧预处理两种。普通焙烧氧化预处理是最传统的焙烧工艺,焙烧过程中会释放大量的 $\text{SO}_2$ 、 $\text{As}_2\text{O}_3$ 等有毒气体,严重污染环境,但焙烧法简单、可靠。微波焙烧是近年来发展起来的又一新的预处理方法,它利用成熟的微波技术,对矿石进行辐射,而能达到其他方法无法达到的效果。由于微波能够加热大多数有用矿物,而不加热脉石矿物,因而在有用矿物和脉石矿物之间会形成明显的局部温差,从而使它们之间产生热应力,当这种热应力达到一定的程度时,就会在矿物之间的界面上产生裂缝,裂缝的产生可以有效地促进有用矿物的单体解离和增加有用矿物的有效反应面积,把金矿物与杂质矿物分离出来后用常规的氰化法浸出。微波焙烧可选择性加热物料,升温速率快,加热效率高;微波加热具有降低化学反应温度的作用;通过控制适当的温度,可以避免产生 $\text{SO}_2$ 和 $\text{As}_2\text{O}_3$ 等有害气体<sup>[28]</sup>。

#### 4.2 湿法化学预处理

湿法化学预处理具有焙烧工艺不具备的优点,不存在过烧或欠烧造成的二次难浸出问题,环境污染小,适应性强,可根据不同的矿石选用不同的试剂进行处理。根据介质的不同,可将其分为碱浸预处理和酸浸预处理;根据反应条件的不同,可将其分为常压预处理和热压预处理。如常压碱浸预处理、常压酸处理、湿法氯化法、硝酸预氧化法、热压化学预处理等<sup>[29-30]</sup>。

##### (1) 常压碱浸预处理

是在常压下通过添加化学试剂对矿石的有关

组分进行氧化和处理的一种化学预处理工艺,其介质为碱性。

##### (2) 常压酸处理

通常是采用过一硫酸对难浸含砷金矿石进行氧化。过一硫酸是一种氧化性比 $\text{H}_2\text{O}_2$ 更强的氧化剂,在pH值较低时是稳定的。过一硫酸是通过在浓硫酸中加入 $\text{H}_2\text{O}_2$ 获得的。过一硫酸可氧化硫化矿,对砷黄铁矿氧化效果更佳。据称这种方法不适合普遍应用于所有难处理金矿石,但在处理与砷黄铁矿共生的金矿石时可获得很好的效果,因为砷黄铁矿极易被氧化。

##### (3) 湿法氯化法

湿法氯化法利用氯气(或含氯氧化剂)对难处理金矿石进行氧化预处理,是碳质难浸金矿石的一种有效处理方法,并在高砷金矿的预处理上也得到应用。氯化物成本高,并对设备腐蚀严重,是制约湿法氯化法推广应用的关键因素。

##### (4) $\text{HNO}_3$ 催化氧化分解法

硝酸是黄铁矿、毒砂和有色金属硫化物最有效的氧化剂。硝酸氧化法是一种以硝酸作催化剂,在低温、低压条件下氧化黄铁矿和砷黄铁矿的预处理方法。

##### (5) 热压化学预处理

在密闭容器中进行热压氧浸出能提高反应速度,在较短的时间内达到反应终点。将热压氧浸出用于高砷难浸金矿石的预处理,能提高金的氰化浸出率,降低氰耗;缺点是对设备的耐压耐腐蚀要求严格,初期投资和生产成本都较高。热压氧化法主要用于预处理硫化矿和砷黄铁矿,根据介质环境的不同,分为热压氧酸浸和热压氧碱浸。

#### 4.3 细菌氧化预处理

细菌氧化预处理与其他工艺相比,可在常温常压下进行硫化物的细菌氧化过程;工艺流程简单、操作方便;投资少、生产成本低、处理后金回收率高,有较高的经济效益;对环境影响小,具有较好的社会效益。因此,细菌预氧化将成为处理难浸出金矿的一种有发展前途的方法。

微生物氧化预处理在处理高砷高硫金矿时,需氧的硫杆菌类嗜酸细菌起着十分重要的作用。它们强化了电化学相互作用并使硫化矿物首先氧化成硫,然后再氧化成硫酸盐。在细菌氧化过程中产生的硫酸、硫化物和二价铁可作为细菌的能

源，这一过程将包裹金的金属硫化物氧化为硫酸盐、碱式硫酸盐等溶解，从而暴露出金矿物，金属离子从而得以浸出，浸出渣再用湿法冶金方法回收金<sup>[30]</sup>。

杨洪英等<sup>[31]</sup>采用经过驯化的 HQ0211 菌对高砷金矿进行氧化预处理—氰化提金实验研究。原矿石直接氰化浸出率只有 29.35%，是典型的高砷难处理矿。经过细菌氧化预处理，金矿脱砷率达到 96.2%，失重率达到 43.9%。矿石的金氰化浸出率由原来的 29.35% 提高到 92.57%，效果十分显著。

宋言等<sup>[32]</sup>以甘肃某含硫、砷、碳及锑等多种成分的难处理金矿为研究对象，开展了细菌氧化—氰化实验研究。浸矿菌种为 HQ0211，经该菌种氧化预处理后，脱砷率最高可达 81.53%，脱砷率最高可达 86.88%，脱碳率最高可达 58.32%，脱锑率最高可达 40.09%。与未经处理的原矿氰化提金结果相比，经过细菌氧化预处理后，金的回收率最高可达 98.65%，相比直接氰化浸出提高了 40.56%。

## 5 湿法浸出工艺研究现状

传统的浸金法是氰化法浸金，工艺成熟简单，成本低廉，是现在黄金浸取最主要的方法。但氰化物毒性剧烈，容易污染环境，现正逐渐被其他非氰浸出工艺取代。

### 5.1 氰化工艺

氰化法自诞生一个多世纪以来，由于其有效性、化学稳定性、低成本和成熟的工艺技术，一直在黄金生产行业处于主导地位。据统计，全世界超过 80% 的黄金采用氰化法提取<sup>[33]</sup>。众所周知，金及其合金的溶解是在碱性氰化物和氧存在的条件下进行的，且溶解过程通常伴随氧的还原和氢氧化物的形成。

一般情况下，堆浸氰化法金浸出率为 50%~80%，常规浸出法金浸出率为 90% 以上。氰化物在浸出阶段的消耗主要是与矿物（如铜和铁等硫化物）作用形成氰络合物，或 CN<sup>-</sup>转化为其他物质，如氰酸盐和硫氰酸盐。此外，氰化物具有很强的毒性，会对环境和人类健康造成很大的危害。因此，氰化浸金过程中产生的废水必须经过处理，以降低氰化物和其他有毒物质的浓度，使其达到排放标准<sup>[31]</sup>。

谷晋川等<sup>[34]</sup>针对山东某金矿进行浮选精矿的氰化浸出研究，探讨了影响金矿氰化浸出的因素。研究表明：通过优化金矿氰化浸出的各种因素，可提高矿浆中的“有效溶解氧”，改善氰化浸出环境，提高浸出速度，缩短氰化浸出时间，降低氰化物用量，提高金矿氰化浸出效果。

### 5.2 非氰化工艺

目前国内外主要的非氰化工艺主要有硫脲法、硫代硫酸盐法、甘氨酸法、卤素法、石硫合剂法以及其他工艺与方法等。

#### (1) 硫脲法

硫脲因其低毒、浸金速度快、试剂易再生，对砷、锑、铜、硫等影响氰化浸出的矿物组成不太敏感而有望替代氰化物作为浸金的无毒浸金试剂。硫脲浸金可分为酸性硫脲浸金工艺与碱性硫脲浸金工艺，其中对酸性硫脲浸金体系研究较多，但硫脲试剂的高消耗量和额外的氧化剂阻碍了其商业化应用。

储春利等<sup>[35]</sup>针对黔西南某卡琳型金矿，在有氧化剂存在的条件下，采用硫脲酸性浸出难浸金矿中的金，在硫酸初始浓度 1.3 mol/L、硫脲浓度 14 g/L、硫酸铁浓度 24 g/L、液固比 10:1、浸出时间 10 h 条件下，金浸出率可达 80% 左右。

#### (2) 硫代硫酸盐法

硫代硫酸盐法由于其低毒、环保、浸出速率快、效率高等特点，成为目前最有可能取代氰化法提金的方法。

硫代硫酸盐法浸金是指在硫代硫酸盐浸金体系中金与硫代硫酸根离子形成可溶性配合物，在使用硫代硫酸盐浸金时，通常需要添加催化剂来提高金的浸出速率。若浸出溶液中不加任何催化剂，纯的硫代硫酸盐浸金速率缓慢。Cu—NH<sub>3</sub>—S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系是国内外研究者长期研究形成的一种硫代硫酸盐浸金标准体系。在 Cu—NH<sub>3</sub>—S<sub>2</sub>O<sub>3</sub><sup>2-</sup>体系中，氨的主要作用是通过形成铜氨络合物稳定铜离子，从而减弱铜离子与硫代硫酸盐之间的反应。此外，该络合物可以将金的溶解速度提高 18~20 倍<sup>[31]</sup>。

邱洋等<sup>[36]</sup>针对贵州紫金矿业某卡林型金矿，研究了用硫代硫酸钠取代氰化钠浸出金，考查了 Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浓度、乙二胺浓度、Cu<sup>2+</sup>浓度、Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浓度和溶液 pH 值等不同因素对金浸出率的影响。实验结果表明：Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 浓度为 0.35 mol/L，乙二胺

浓度为 0.1 mol/L,  $\text{Cu}^{2+}$ 浓度为 0.075 mol/L,  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 浓度为 0.1 mol/L, 溶液 pH 值为 9.5, 室温 (25 °C) 浸出 4 h 为较优浸出条件, 金的浸出率最高可达 75.56%。证明了硫代硫酸盐对贵州卡林型金矿具有一定的浸出效果, 且浸出过程反应迅速、低毒高效、环境友好。

### (3) 甘氨酸法

甘氨酸是一种无毒、不挥发且生产成本较低的试剂, 在较宽的 pH 值、 $E_h$  和温度范围内, 甘氨酸与铜和贵金属均可形成稳定的络合物。另外, 在甘氨酸浸金体系中, 除了少部分甘氨酸会损失在浸渣中, 其余甘氨酸还可以被回收并循环利用。碱性甘氨酸体系已被证明有利于金的浸出。与氰化物相比, 其价格相近或更低。

王虎等<sup>[37]</sup>为了解决铜对金浸出率的不利影响, 通过在氰化过程中添加甘氨酸作为助浸剂与氰化物形成协同作用, 对含铜金矿石进行了氰化浸出实验。结果显示甘氨酸可以有效改善含铜金矿石的氰化浸出工艺指标, 在提升金回收率的同时, 能够降低氰化钠的单耗, 金浸出率提高了 16.22%, 氰化钠单耗降低了 14.90%, 符合企业绿色发展的理念, 且综合效益显著。

### (4) 卤素法

卤族元素的化学性质非常活泼, 卤族元素原子的最外电子层上都有 7 个电子, 容易获得 1 个电子而形成稳定结构, 属于强氧化剂, 可直接与金属化合成盐类。卤素离子  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{Br}^-$ 、 $\text{I}^-$  均可与金属离子形成稳定的配合物, 利用这一性质, 常将它们与适当的氧化剂相结合, 组成金的浸出剂<sup>[38]</sup>。

氯化卤素法在氰化法出现之前被广泛用作从焙烧矿石和精矿中回收金的浸出试剂, 且氯化浸金速率高于氰化浸金, 低 pH 值、高浓度氯化物/氯和金颗粒的高比表面积, 以及升高温度有利于氯化浸出进行。它能浸出含硫、难熔的金矿, 甚至无需进行压力氧化或焙烧的预处理。然而氯化物溶液具有腐蚀性和氧化性, 这在工业规模运用上增加了设备与建筑方面的成本。

溴化卤素法在酸性环境和碱性环境中都可有效浸出金矿物, 且浸出速率快。将溴化物添加到含氯和次氯酸盐的浸出溶液中便可产生溴, 从而达到浸出金的目的。溴化物浸金过程中使用的溴酸盐比溴更好储存, 而且它不会挥发到大气中, 且溴酸盐还可降解, 避免废液的排放污染。尽管

溴酸盐的毒性比氰化物低, 但它仍对人体有一定的危害。

碘化卤素法需要控制好溶液 pH 值, pH 值低于 11 时, 碘是一种很好的金浸出试剂, 此时金的浸出率高; 添加辅助氧化剂, 如次氯酸钠和氨水可提高金浸出率, 并减少碘的消耗。与其他卤化物体系相比, 碘化卤素法体系具有较低的电势和较高的浸出速率, 对贵金属浸出有很好的选择性。碘化物对金矿的浸出速率不仅大于氰化物和硫脲对金矿的浸出速率, 而且碘溶液无毒, 对环境友好。

### (5) 石硫合剂法

石硫合剂是我国首创的一种无氰浸金药剂, 石硫合剂的制备成本较低, 一般采用石灰或者氢氧化钙与硫磺合成, 在碱性环境下浸金时主要的有效成分为多硫化钙及硫代硫酸盐, 由于两者对金都具有一定的浸出效果, 所以试剂具有非常优良的浸金性能。药剂使用比氰化物更容易掌握和控制, 浸出率比氰化物高, 浸出时间相对于氰化物有所减少, 适用的矿种也比氰化物更加广泛。

## 6 结 论

(1) 我国虽然金矿资源丰富, 是世界上最大的黄金生产国、消费国和进口国, 但对外依存度高达 58.2%。金矿选冶技术研究相对不足, 尤其是含碳高砷高硫难处理金矿石资源选冶技术, 应强化对金矿选冶技术的系统研究, 提高金矿“三率”指标, 保障金矿这种国家重要的战略资源供给。

(2) 浮选法是我国金矿选矿的重要手段, 加强新型绿色高效浮选药剂研发是提高金矿选别指标的技术关键, 应大力加强绿色、耐低温、低成本浮选药剂的研发与应用, 不断提升整体选别性能。

(3) 应强化对含碳高砷高硫难处理金矿无氰浸出工艺技术与无氰浸出药剂的系统研究, 形成完整的理论体系和实践经验并工业化, 为我国金矿的高效、合理开发提供基础数据支撑, 实现经济效益和环境效益的双赢, 推动我国金矿资源的健康和可持续开发利用。

## 参考文献:

[1] 王成龙, 王士强, 洪涛, 等. 我国金矿资源现状及其可持续

- 发展研究[J]. *中国矿山工程*, 2017, 12(6):42-45.
- WANG C L, WANG S Q, HONG T, et al. Situation and sustainable development research of gold resources in China[J]. *China Mine Engineering*, 2017, 12(6):42-45.
- [2] 倪曦, 白海铃. 中国金矿资源特征及成矿规律概要[J]. *找矿技术*, 2021(10):60-61.
- NI X, BAI H L. Characteristics of gold resources and metallogenic regularity in China[J]. *Prospecting Technology*, 2021(10):60-61.
- [3] 自然资源部. 中国矿产资源报告 2021 [M]. 北京: 地质出版社.
- Ministry of Natural Resources. China Mineral Resources 2021[M]. Beijing: Geological Publishing House.
- [4] 冯丹丹. 2017 年度全球黄金资源供需形势分析[J]. *矿产保护与利用*, 2019(1):150-154.
- FENG D D. Analysis of supply and demand situation of gold resources in 2017[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):150-154.
- [5] 许文力. 浅谈我国金矿资源现状[J]. *世界有色金属*, 2017(9):134-135.
- XU W L. Brief discussion on present situation of gold resources in China[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(9):134-135.
- [6] 中国地质调查局. 中国地质调查百项成果 [M]. 北京: 地质出版社.
- China Geological Survey. 100 results of China Geological Survey [M]. Beijing: World Nonferrous Metals, 2017(9): 134-135.
- [7] 卢杰, 王建国, 严松涛, 等. 我国西部金矿资源现状及发展对策[J]. *中国矿业*, 2015(10):10-14.
- LU J, WANG J G, YAN S T, et al. Analysis of the current situation and developmental counter measures of gold resources in West China[J]. *China Mining Magazine*, 2015(10):10-14.
- [8] 魏春霞. 中国金矿资源的现状及前景分析[J]. *中国金属通报*, 2018(1):19-20.
- WEI C X. Analysis of present situation and prospect of gold resources in China[J]. *China Metal Bulletin*, 2018(1):19-20.
- [9] 寸圭, 鞠毓斌. 我国金矿资源的概况[J]. *黄金科学技术*, 1999(6):1-7.
- CUN G, JU Y F. The general situation of gold resources in China[J]. *Gold Science and Technology*, 1999(6):1-7.
- [10] 张龙坤. 我国金矿资源前景与分析[J]. *世界有色金属*, 2017(20):151-152.
- ZHANG L K. The gold mine resource prospects and analysis in our country[J]. *World Nonferrous Metals*, 2017(20):151-152.
- [11] 国土资源部中国地质调查局, 新疆维吾尔自治区人民政府. 新疆金矿资源调查报告 [R]. 北京: 国土资源部中国地质调查局, 2016: 1-9.
- China Geological Survey Bureau, Ministry of land and resources, People's Government of Xinjiang Uygur Autonomous Region. Xinjiang gold resources survey report [J]. Beijing: China Geological Survey Bureau, 2016: 1-9.
- [12] 黄庆. 新疆金矿资源特点及开发[J]. *地球*, 2014(7):73-73.
- HUANG Q. Characteristics and exploitation of gold resources in Xinjiang[J]. *Earth*, 2014(7):73-73.
- [13] 杜亚龙, 李智明, 姜寒冰, 等. 新疆地区金矿分布特征及找矿潜力分析[J]. *西北地质*, 2016, 49(1):121-134.
- DU Y L, LI Z M, JIANG H B, et al. Analysis on the distribution and ore potentials of gold deposits in Xinjiang[J]. *Northwestern Geology*, 2016, 49(1):121-134.
- [14] 杨思军, 徐宏斌, 曹锋, 等. 尼尔森选矿机在四方金矿重选工艺中的应用[J]. *现代矿业*, 2015(5):187-189.
- YANG S J, XU H B, CAO F, et al. Application of Nelson concentrator in gravity separation of Sifang gold mine[J]. *Modern Mining*, 2015(5):187-189.
- [15] 刘静宇. 某金矿重选尾矿回收金、铜的工艺研究[J]. *矿产综合利用*, 2020(1):112-115.
- LIU J Y. Recovery of gold and copper from tailings of gravity separation in a gold ore[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(1):112-115.
- [16] 崔学奇, 张耀军, 吕宪俊, 等. 重选法回收某高碳质金矿石中金的试验研究[J]. *黄金*, 2007(1):40-42.
- CUI X Q, ZHANG Y J, LV X J, et al. Experimental research on gold recovery from high-carbon gold ore with gravity concentration[J]. *Gold*, 2007(1):40-42.
- [17] 朱一民, 葛文成, 张淑敏, 等. 内蒙古某金矿尼尔森重选—低氰浸出试验研究[J]. *金属矿山*, 2021(7):119-123.
- ZHU Y M, GE W C, ZHANG S M, et al. Nielsen gravity concentration combined with low cyanide leaching test research for a gold mine in Inner Mongolia[J]. *Metal Mine*, 2021(7):119-123.
- [18] 吕良, 岳铁兵, 王威, 等. 非洲某氧化型金矿重选—浸出工艺研究[J]. *黄金*, 2021(3):56-59.
- LV L, YUE T B, WANG W, et al. Research of gravity-leaching process of an oxidized gold ore in Africa[J]. *Gold*, 2021(3):56-59.

- [19] 杜飞飞, 杨志军, 郭存丰. 某金矿浮选试验研究[J]. *现代矿业*, 2012(1):30-34.  
DU F F, YANG Z J, GUO C F. Flotation test research of a gold mine[J]. *Modern Mining*, 2012(1):30-34.
- [20] 余世磊, 王毓华, 王进明, 等. 新疆某黄铁矿型低品位金矿石浮选试验[J]. *金属矿山*, 2013(5):78-81.  
YU S L, WANG Y H, WANG J M, et al. Flotation experimental research on a low-grade pyritic gold in Xinjiang[J]. *Metal Mine*, 2013(5):78-81.
- [21] 汤亦婧, 罗思岗, 陆红羽. 辽宁某金矿选矿试验研究[J]. *有色金属:选矿部分*, 2022(4):105-110.  
TANG Y J, LUO S G, LU H Y. Experimental study on mineral processing of a gold ore in Liaoning[J]. *Nonferrous Metals(Mineral Processing Section)*, 2022(4):105-110.
- [22] 陈广, 羊坤, 陈思竹, 等. 浮-重选联合流程选别金尾矿实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):131-134.  
CHEN G, YANG K, CHEN S Z, et al. Study on separation of gold from tailings by combined floatation-gravity beneficiation flowsheet[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2022(2):131-134.
- [23] 毛益林, 陈晓青, 杨进忠, 等. 四川某石英脉型金矿联合选矿工艺[J]. *有色金属工程*, 2015(3):68-70.  
MAO Y L, CHEN X Q, YANG J Z, et al. Combined beneficiation on a quartz vein type gold ore in Sichuan[J]. *Nonferrous Metals Engineering*, 2015(3):68-70.
- [24] 王振, 邹旦, 赵开乐, 等. 硫化型金矿浮选技术研究现状及进展[J]. *化工矿物与加工*, 2022(6):54-60.  
WANG Z, ZOU D, ZHAO K L, et al. Research status and progress of the flotation technology for gold sulfide ore[J]. *Industrial Minerals & Processing*, 2022(6):54-60.
- [25] 康建雄, 周跃, 吕中海, 等. 含砷金矿浮选研究现状与展望[J]. *四川有色金属*, 2022(6):54-60.  
KANG J X, ZHOU Y, LV Z H, et al. The research situation and prospects of floatation of arsenic containing gold ores[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2022(6):54-60.
- [26] 张文杰, 朱辉, 谢贤, 等. 某含硫高碳难处理金矿选矿工艺研究[J]. *有色金属:选矿部分*, 2022(6):54-60.  
ZHANG W J, ZHU H, XIE X, et al. The research situation and prospects of floatation of arseniccontaining gold ores[J]. *Sichuan Nonferrous Metals*, 2022(6):54-60.
- [27] 邱显扬, 梁冬云, 洪秋阳, 等. 难处理金矿石的工艺矿物学及可选冶特性分析[J]. *贵金属*, 2020, 41(2):36-44.  
QIU X Y, LIANG D Y, HONG Q Y, et al. Process mineralogy and process improvement analysis of a refractory gold ore[J]. *Precious Metals*, 2020, 41(2):36-44.
- [28] 印万忠, 洪正秀, 马英强, 等. 国内外含砷硫金矿预处理技术的研究进展[J]. *现代矿业*, 2011(2):1-8.  
YIN W Z, HONG Z X, MA Y Q, et al. Research progress of pretreatment technology for As, S-bearing gold ore concentrate at home and abroad[J]. *Modern Mining*, 2011(2):1-8.
- [29] 周源, 田树国, 刘亮. 高砷金矿脱砷预处理技术进展[J]. *金属矿山*, 2009(2):98-101.  
ZHOU Y, TIAN S G, LIU L. Progress in the pretreatment technology for arsenic removal from high arsenic gold ore[J]. *Metal Mine*, 2009(2):98-101.
- [30] 邱廷省, 聂光华, 张强, 等. 难处理含铜金矿石预处理与浸出技术现状及进展[J]. *黄金*, 2005(8):30-34.  
QIU T S, NIE G H, ZHANG Q, et al. Present situation and developmental trend of pretreatment and leaching technology for refractory copper-bearing gold ores[J]. *Gold*, 2005(8):30-34.
- [31] 杨洪英, 范金, 崔日成, 等. 难处理高砷金矿的细菌氧化一提金研究[J]. *贵金属*, 2009(3):1-3.  
YANG H Y, FAN J, CUI R C, et al. Study on bacterial oxidation-extraction gold of refractory gold ore[J]. *Precious Metals*, 2009(3):1-3.
- [32] 宋言, 杨洪英, 佟琳琳, 等. 甘肃某复杂难处理金矿细菌氧化一氰化实验研究[J]. *黄金科学技术*, 2018(2):241-247.  
SONG Y, YANG H Y, TONG L L, et al. Experimental study on bacterial oxidation-cyanidation of a complex refractory gold mine in Gansu Province[J]. *Gold Science and Technology*, 2018(2):241-247.
- [33] 李骞, 董斯宇, 许瑞, 等. 金矿提金技术及其研究进展[J]. *黄金*, 2020(9):86-101.  
LI Q, DONG S Y, XU R, et al. Gold extraction technology for gold ores and its research progress[J]. *Gold*, 2020(9):86-101.
- [34] 谷晋川, 刘亚川, 张允湘. 山东某金矿氰化浸出过程中影响因素的研究[J]. *矿产综合利用*, 2002(3):3-6.  
GU J C, LIU Y C, ZHANG Y X. Research on the influencing factors of cyanide leaching of a gold ore in Shandong Province[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2002(3):3-6.
- [35] 储春利, 蒋中刚, 唐道文. 难浸金矿硫脲浸出试验研究[J]. *有色金属:冶炼部分*, 2014(3):37-39.  
CHU C L, JIANG Z G, TANG D W. Experimental study on leaching of refractory gold ore with thiourea[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2014(3):37-39.
- [36] 邱洋, 黄成戈, 唐道文, 等. 硫代硫酸钠浸出贵州卡林型

金矿[J]. *有色金属科学与工程*, 2021(1):22-27.

QIU Y, HUANG C G, TANG D W, et al. Leaching of Guizhou Carlin-type gold mine with sodium thiosulfate at room temperature[J]. *Nonferrous Metals Science and Engineering*, 2021(1):22-27.

[37] 王虎, 秦贞军, 石宝兴, 等. 甘氨酸在含铜金矿氰氧化浸出工艺中的应用及研究[J]. *现代矿业*, 2022(5):140-141.

WANG H, QIN Z J, SHI B X, et al. Application and research

of glycine in cyanide leaching process of copper-bearing gold ore[J]. *Modern Mining*, 2022(5):140-141.

[38] 彭科波, 高利坤, 饶兵, 等. 金矿非氰化浸金研究进展[J]. *工程科学学报*, 2021(7):871-882.

PENG K B, GAO L K, RAO B, et al. Research progress of non-cyanide gold leaching in gold mines[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2021(7):871-882.

## General Situation of Gold Resources and Research Progress of Mineral Processing and Hydrometallurgy Technology in China

Qiu Man<sup>1</sup>, Huang Xuexiong<sup>2</sup>, Mao Yilin<sup>3</sup>, Zeng Xiaobo<sup>3</sup>

(1. Xinjiang Production and Construction Corps Geological Exploration Center, Urumqi, Xinjiang, China;

2. Natural Resources Bureau of Xinjiang Production and Construction Corps, Urumqi, Xinjiang, China;

3. Institute of Multipurpose Utilization of Mineral Resources, CAGS, Research Center of Multipurpose Utilization of Metal Mineral Resources of China Geological Survey, Chengdu, Sichuan, China)

**Abstract:** Gold resources in China are mainly concentrated in Shandong, Gansu, Xinjiang, Inner Mongolia, Henan and Yunnan Provinces, which are mainly composed of placer gold, rock gold and associated gold. China has rich gold resources and is the largest gold producing, consuming and importing country in the world, but it has a high degree of foreign dependence and a large amount of gold consumption depends on imports. It is an important measure to ensure the safety of gold resources to strengthen the research of domestic gold mining technology and realize its efficient and rational development. This paper introduces the distribution and general situation of gold ore resources in China and abroad, summarizes the research status of gold ore beneficiation technology and beneficiation reagents, pretreatment technology of refractory gold ore and wet leaching technology, expounds the salient characteristics of gold ore beneficiation technology, as well as its advantages and limitations. It is expected that cyanide-free leaching process and green and efficient cyanide-free leaching agents will be the development direction of green gold extraction from refractory gold ores, which will provide reference for further research and application of gold extraction technology.

**Keywords:** Gold; Beneficiation process; Pretreatment process; Wet leaching; Non-cyanide process