DOI 10.15302/J-SSCAE-2024.11.032

我国黄金绿色冶金发展潜力研究

柴立元[1,2,3*]，颜旭[1,2,3]，杨洪英[4]，王云燕[1,2,3]，佟琳琳[4]，王海鹰[1,2,3]，史美清[1,2,3]，韩雯雯[4]

（1. 中南大学冶金与环境学院，长沙 410083；2. 有色金属强化冶金新技术全国重点实验室，长沙 410083；
3. 国家重金属污染防治工程技术研究中心，长沙 410083；4. 东北大学冶金学院，沈阳 110819）

摘要：黄金是稀缺的全球性战略资源，黄金工业亟需顺应绿色、低碳、智能的发展趋势，以绿色冶金推动自身高质量发展；绿色冶金技术发展、氰化尾渣处理技术创新密切相关、相辅相成，共同构成黄金工业绿色转型的核心内容。本文从资源约束、环境挑战、科技应用角度出发，深入剖析了我国黄金工业的需求背景与行业概况，从国际、国内两方面系统梳理了黄金绿色冶金技术研究及应用进展，进一步讨论了黄金氰化尾渣处理现状及技术应用情况。在全面把握黄金工业现状的基础上，研判了黄金绿色冶金技术发展潜力，提出了有色伴生金冶炼和二次资源循环利用是突破传统黄金资源限制的重要方向、高端新材料是黄金科技属性彰显下产业升级的重要契机、智能化转型是黄金工业生产模式革新与效率提升的战略路径、产业融合集群化是黄金工业生态重构与协同创新的优选方案等技术性判断。为此建议，加强黄金氰化尾渣安全利用与“生态回归”大规模消纳、加强黄金科技属性开发与高端利用、推进有色金属–黄金产业融合发展，精准保障我国黄金工业绿色可持续发展。

关键词：黄金；绿色冶金；无氰提金；氰化尾渣；黄金高端材料；有色金属–黄金产业融合

中图分类号：TF831　**文献标识码：**A

Development Potential of Green Gold Metallurgy in China

Chai Liyuan[1,2,3*], Yan Xu[1,2,3], Yang Hongying[4], Wang Yunyan[1,2,3], Tong Linlin[4], Wang Haiying[1,2,3], Shi Meiqing[1,2,3], Han Wenwen[4]

(1. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Metallurgy for Non-ferrous Metals, Changsha 410083, China; 3. Chinese National Engineering Research Centre for Control & Treatment of Heavy Metal Pollution, Changsha 410083, China;
4. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Gold is a scarce type of global strategic resources. The gold industry needs to follow the trend of green, low-carbon, and intelligent development, and promote its high-quality development through green metallurgy. The development of green metallurgical technologies and the innovation in cyanide tailing treatment technologies are closely related and complementary, together constituting the core content for the green transformation of the gold industry. From the perspectives of resource constraints, environmental challenges, and scientific and technological application, this study analyzes the demand and industry overview of China’s gold industry, sorts out the research and application progress of green technologies regarding gold metallurgy from both international and domestic perspectives, and further discusses the current status and technical application of cyanide

收稿日期：2024-11-29；**修回日期：**2025-03-13

通讯作者：*柴立元，中南大学冶金与环境学院教授，中国工程院院士，研究方向为冶金环境工程；E-mail: lychai@csu.edu.cn

资助项目：中国工程院咨询项目“氰渣无害化处置与黄金冶炼绿色发展战略研究”(2023-XZ-67)；国家自然科学基金项目(52121004)

本刊网址：sscae.engineering.org.cn

tailing treatment in the gold industry. Considering the current status of the gold industry, the study identifies the development potentials of green gold metallurgy. Specifically, non-ferrous-associated gold smelting and secondary resource recycling are two important directions to break the limitations of traditional gold resources; high-end new materials are key for industrial upgrading under the manifestation of gold's scientific and technological attributes; intelligent transformation is a strategic path for the production mode innovation and efficiency improvement of the gold industry; and industrial integration and clustering is the preferred solution for ecological reconstruction and collaborative innovation of the industry. Furthermore, it is recommended to enhance the safe utilization and ecological consumption of gold cyanide tailings, strengthen the development of gold's scientific and technological attributes and high-end utilization, and promote the integrated development of non-ferrous metals and the gold industry, thereby ensuring the sustainable development of China's gold industry.

Keywords: gold; green metallurgy; cyanide-free gold extraction; cyanide tailings; gold high-end materials; nonferrous metals-gold industry integration gold industry integration

一、前言

黄金是一种稀缺的全球性战略资源，也是世界上为数不多的兼具货币、商品、金融、科技等属性的贵金属之一，对高新技术发展、金融安全、国家战略储备具有重要意义[1]。当前，全球正在经历重大变革，传统制造业转型升级尤为紧迫，黄金工业亟需顺应绿色、低碳、智能的发展趋势，以绿色冶金推动自身高质量发展。黄金冶金技术历史悠久，经历了混汞法、重选法、氰化法等技术革新。其中，氰化提金工艺成熟，在成本效益方面具有优势，一直是主流的黄金提取方法[2]。然而，氰化法会产生大量的氰化尾渣，其中含有的氰化物因具有毒性而被视为危险废物，相应的环境风险大、处理及处置困难。这与绿色冶金的发展理念相背离，因而解决氰化尾渣问题成为黄金工业发展的重要课题。

一段时期以来，国内外主要从无氰提金技术开发和应用、氰化尾渣无害化处理技术开发和应用两方面开展黄金绿色冶金探索。无氰提金技术开发和应用属于推动黄金绿色冶金的源头性努力，旨在避免氰化物的使用，从根本上消除氰化尾渣的产生。已有多项无氰提金技术获得报道，如硫代硫酸盐浸出法、卤化物法、硫脲法等[3]，但实际应用案例较少。在氰化尾渣无害化处理方面，国内外的应对策略存在明显差异：国外主要依赖尾矿库堆存，国内因土地资源受限、尾矿库存在安全风险等因素，较难采用堆存方式容纳大体量的氰化尾渣。为此，国内正在积极探索适合国情的氰化尾渣处理技术，分为氰根回收、破坏、转移3种主要途径，涉及酸化回收法、碱性氯化法、H_2O_2氧化法、固液分离法等细分类型[4,5]，但依然未能有效缓解氰化尾渣无处堆存的困境。开展氰化尾渣的安全利用与大规模消纳，仍是我国黄金工业面临的重大且迫切挑战。

本文立足我国黄金工业绿色发展的重大需求，全面审视黄金工业在资源约束、环境挑战、科技应用等方面存在的问题；将从源头减少污染的绿色冶金技术、实现末端治理和资源化利用的氰化尾渣处理视为有机整体，全面梳理相关技术的研究与应用进展，深入辨识黄金工业绿色转型的关键支撑要素。进一步研判影响黄金绿色冶金发展的关键因素和潜在机遇，据此提出针对性策略建议，为我国黄金工业高质量发展研究、从“黄金大国”向“绿色黄金强国”战略转型提供参考。

二、黄金工业的需求背景与行业概况

我国连续16年黄金产量居世界首位，连续10年成为国际最大的黄金消费市场。不可忽视的是，我国黄金工业“大而不强”“全而不精”，资源约束趋紧，环境问题显著，科技属性高端化渐受重视、创新能力亟待加强的矛盾鲜明，低端供给过剩、高端供给不足并存的现象突出，因而提升竞争优势、实现转型升级的任务依然艰巨[6]。

（一）资源约束：禀赋不足且对外依存

我国黄金矿产资源约束性强，长期以来对外依存度较高，与世界最大的黄金生产国和消费国的地位不相称。2023年，我国黄金产量为375.16 t，包含黄金首饰、金条及金币、工业及其他用金在内的消费量达到1089.69 t，黄金储量在全球居第四位[7]。然而，我国境内的金矿储量仅占全球探明总量的5%，黄金原料供应高度依赖进口，对外依存度为46.22%[8]。我国黄金矿产资源禀赋先天不足，开发

难度大，如金矿床（点）虽有约6000处，但中小型金矿床占比超过90%[9]，世界级大型金矿稀缺。相比之下，美国拥有世界上最大储量的内华达金矿，澳大利亚、加拿大分别拥有2~3个世界级大型金矿，均可以持续保障各自的黄金生产需求[10]。此外，我国黄金矿产资源质量不高，多数金矿“贫、细、杂”，难处理黄金资源的占比超过30%[11~13]；这些矿石具有高砷、高碳特征，其中的金主要以微细粒浸染的形式存在，选冶难度大，金的直接氰化浸出率低于80%，带来生产成本高、环境污染重的问题。我国黄金生产企业较多依赖进口的黄金资源，尤其是优质的黄金矿产，以满足国内市场上庞大的生产和消费需求。

（二）环境挑战：氰化尾渣处理压力极大

氰化提金技术问世超过130年，因其成熟、高效、成本优势一直是主流工艺，但始终存在氰毒害问题[14]，这是黄金工业环境风险的主要源头。据不完全统计，我国氰化尾渣堆存量约为1×10^9 t，且仍以近1×10^9 t/a的速度在增加，相应环境风险亟待控制。目前虽有多种氰化尾渣无害化末端处理技术，部分已实现工业应用，但适应性不佳、处理成本偏高的情况未能消除。无氰提金技术发展超过50年，但现有技术工艺成本高、操作复杂、成熟度低，多数处于实验或应用试验阶段，工程应用案例稀少。鉴于氰化提金工艺在可预见的未来仍将占据行业主导地位、难处理金矿仍是主要的原料来源，氰化尾渣产生和处理将面临“新旧账”叠加的压力[15~18]。

（三）科技应用：高端和创新需求不足

黄金具有良好的导电性、柔韧性、耐腐蚀性，在电子工业、半导体制造、航空航天装备等领域得到广泛应用。这类科技用金在黄金总需求中占比较小，1992年以来全球科技用金需求总体稳定但呈下降趋势，2023年降至297.8 t，首次低于300 t，占全球黄金总需求的比例不足6%[10]，但对黄金材料的性能要求极高，代表了先进工业、高技术领域对贵金属的特定需求。科技用金是衡量一个国家制造业发展水平的标志之一，也是黄金工业价值链高端化的重要体现。在我国，科技用金量从2010年的56 t增长至2023年的84 t，占国内黄金总需求的比例接近8%[7]，应用领域主要是电子工业。合理预计，随着可穿戴设备、物联网、第五代移动通信（5G）、人工智能硬件、绿色能源、航空航天装备等领域的进一步发展，我国科技用金需求将持续增长。然而，我国黄金仍以资源开发和初级加工为主，处于国际黄金产业链的中低端，高端应用研发动力不足。与此同时，美国、日本等发达国家正加速布局黄金在量子计算、新能源、生物医学等前沿领域的应用，进一步拉大国际国内技术差距。我国黄金工业亟需加快黄金高端材料制备关键技术研究及应用，构建多途径高端应用体系，强化与战略性新兴产业融合发展[1]。

三、黄金绿色冶金技术进展

含金矿物复杂、黄金化学性质稳定，黄金冶金需要特定的药剂及预处理操作。黄金冶金技术种类多、工艺流程较长，国内外主要发展了重选法、浮选法、混汞法、氰化法、非氰化法、生物冶金法等。其中，氰化法历经百余年仍是主流，但在提金过程中产生氰化尾渣而对环境构成严重威胁。对应地，发展黄金绿色冶金技术，不仅是提高黄金提取效率并降低成本的技术革新，而且是解决氰化尾渣环境风险、实现黄金工业可持续发展的关键举措。绿色冶金技术发展、氰化尾渣处理技术创新密切相关、相辅相成，共同构成黄金工业绿色转型的核心内容。

（一）国际研究进展

世界黄金生产历史悠久（见图1），混汞法、重选法作为最早的提金方法，应用时间超过2000年，直到19世纪后因伴生的汞污染等问题而逐渐淘汰；目前国际上的黄金冶金以氰化提金为主。长期以来，氰化提金相关研究致力于缩短氰化浸出时间、提高浸出率、降低氰化物消耗量。近年来，富氧助浸、药剂助浸、外场强化等方式具有显著的强化氰化效果，得到了实际应用[2]。氰化法产生的氰化尾渣问题却始终难以解决，国际上正在积极探索各种替代方案[19,20]。

无氰提金技术作为解决氰化尾渣问题的源头性控制方案，长期受到关注；核心措施是选择适宜的非氰浸出剂，由此衍生出一系列技术，如硫代硫酸盐法、卤化物法、硫脲法、硫氰酸盐法等[3,21]，但

多处于实验室研究和试验阶段，实际应用案例并不多。美国内华达科尔特斯金矿、卡琳金矿等黄金生产项目是有限的应用案例，根据不同矿石的特性和处理需求，灵活采用氰化浸出、硫代硫酸盐浸出方法[22,23]：前者用于处理氧化矿和某些硫化矿，后者用于处理含有机碳的矿物；建成“高压氧化–硫代硫酸盐浸出–树脂吸附”工艺流程（见图2），在2014年投入实际应用。

整体来看，无氰提金技术尚难以完全取代氰化提金技术，但在特定情况下可以进行两者的搭配应用；国际上正在探索相应的“低氰提金”技术路线，有望成为未来黄金冶金的新趋势。

（二）国内研究进展

20世纪30年代，我国企业开始采用氰化法提取黄金。20世纪60年代，国家积极推动矿产金生产以支持经济发展，如1967年山东招远金矿的两个选金厂首次实现连续机械搅拌氰化工艺生产黄金。此后，氰化提金厂纷纷建立，氰化提金技术进入规模化应用阶段。目前，氰化法几乎覆盖国内全部黄

图1　国际黄金冶金技术发展脉络

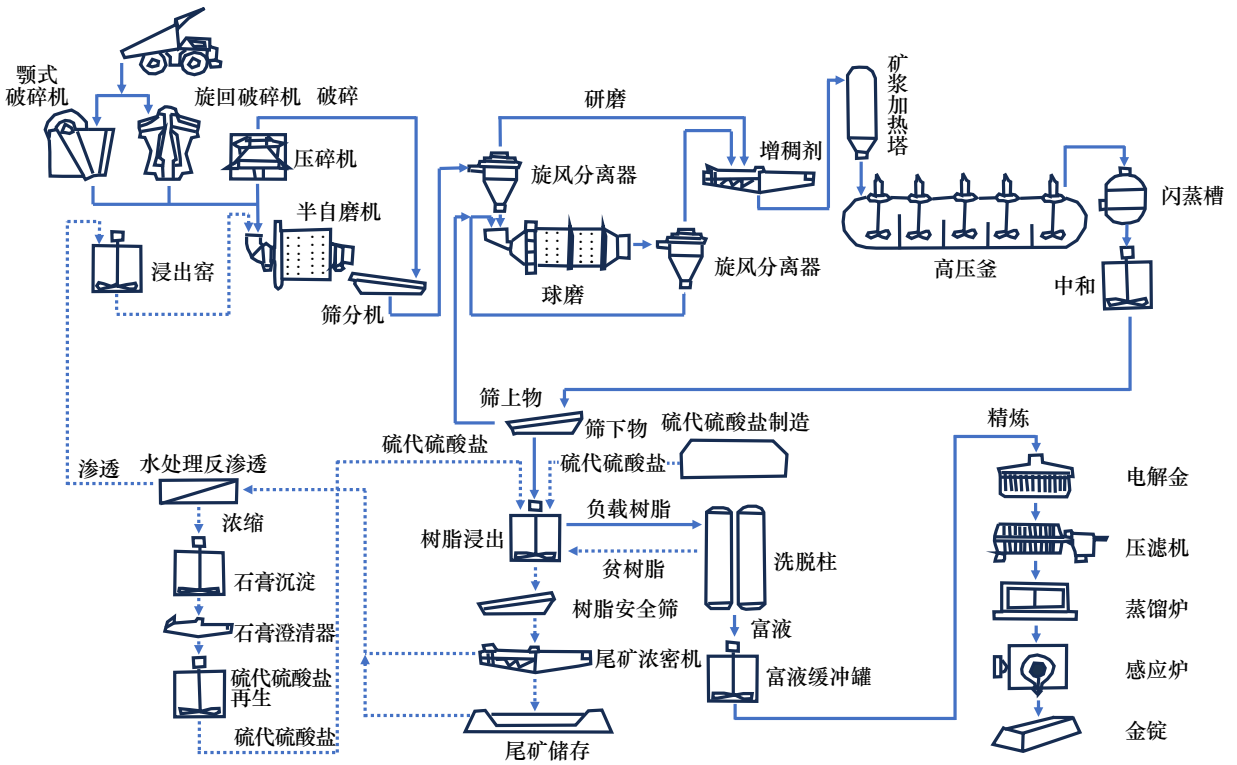

图2　美国内华达卡琳金矿项目“高压氧化–硫代硫酸盐浸出–树脂吸附”工艺流程示意图

金生产，应用水平进入世界先进行列。在难处理金矿方面，国内自主研发了生物氧化提金、焙烧氧化、热压氧化、超细磨提金工艺以及高纯金精炼技术等，均处于国际领先水平[24]。

在无氰提金方面，国内开展了较多的理论与应用研究。针对硫代硫酸盐浸金速率缓慢、试剂消耗量过大的问题，中南大学研究团队揭示了铜、氨及伴生矿物对催化试剂氧化消耗的机理，构建了基于竞争吸附和新催化体系的降耗新机制，实现硫代硫酸盐消耗量下降70%以上；揭示了含硫、砷复杂难处理金矿生物预氧化的钝化机理，建立了银、铜离子催化的生物预氧化机制，将砷黄铁矿等矿物的氧化率提高20%~50%[25]。昆明理工大学有色金属真空冶金团队开发了“高温熔炼捕集–溶液电解富集–真空气化分离–梯级精炼提纯”工艺用于生产贵金属，开辟了贵金属清洁高效冶炼新途径，支持无氰炼金并在多家冶金企业获得应用[26]。2019年，山东黄金集团有限公司在海南抱伦金矿应用了由东北大学、中国矿业大学研发的多项新技术，如梯级磨矿–两段尼尔森重选、多流态梯级强化柱机联合浮选、尾矿制备环保红砖，实现了高效提金和尾矿全面利用，构建了无尾矿和废弃物的绿色矿山。后续，在无氰提金技术应用方面仍需深入研究，基于理论和实验室成果拓展工业应用[27]。

不可忽视的是，随着易处理金矿石资源的逐渐枯竭，国内黄金生产将更多依赖结构复杂、品位低、杂质含量高的难处理金矿。有关提高金、银回收率，有价金属综合利用率的技术也在发展完善中，形成了多项难处理金矿焙烧技术成果，如两段焙烧法、循环流态化焙烧等。鉴于矿石性质趋于复杂，传统的单一浮选工艺不再适用，重选–浮选、浮选–氰化、氰化–浮选、重选（浮选）–炭浸等联合工艺流程有望成为后续应用的主流形式。

四、黄金氰化尾渣处理现状及技术应用情况

（一）黄金氰化尾渣的特性及处理现状

氰化提金工艺带来氰化尾渣环境问题，处理氰化尾渣是黄金工业绿色发展的关键环节、绿色冶金技术体系的重要组成部分。氰化尾渣成分复杂，根据来源可分为3类：堆浸氰化尾渣、全泥氰化尾渣、金精矿氰化尾渣[28]。其中，金精矿氰化尾渣指以经过选别作业的金矿石为原料，在再磨、预处理后，采用氰化浸出提取黄金后的渣，具有黄金含量低（<1 g/t）、含水率较高、毒性强（浸出毒性>30 mg/L）、总氰化合物含量极高（>900 mg/g）、游离氰化物含量较低的特征。在《国家危险废物名录（2025版）》中，金精矿氰化尾渣仍列为危险废物，其他类型的氰化尾渣在浸出毒性达标后将不再列为危险废物[29]。

氰化尾渣中的总氰化物主要以无机氰化物的形态存在，依据稳定性可分为3类：游离态氰化物、弱酸条件下可解离氰化物、强酸条件下可解离氰化物[30]。针对尾渣中不同形态的氰化物，可选择对应的技术手段进行脱除处理。

在美国、欧洲，氰化尾渣尾矿未归类为危险废物，通常无需特殊处理，这是因为该地区的大型黄金生产项目配套建设了尾矿存储设施。美国内华达州绿松石岭金矿项目建成3个并计划增建第4个尾矿存储设施，同时制定了尾矿库闭坑及复垦规划[31]。位于加纳的阿哈福北金矿项目建立了尾矿存储设施，以循环利用水的方式降低氰化物对环境的影响[32]。这表明，国外主要通过尾矿库堆存进行氰化尾渣处置，再通过严格管理来控制环境风险。

然而，国外的处理方式并不完全适应我国的实际情况。长期以来，受制于处理技术存在局限性，加之环保意识不强，国内的氰化尾渣主要以露天堆存方式进行处理，不仅占用大量的土地资源，而且对环境构成明显威胁。此外，在有限的土地资源条件下，尾矿库建设面临库容不足、“只减不增”、老旧库安全风险偏高的严峻挑战，难以满足大量氰化尾渣尾矿的处理和消纳需求。因此，亟需探索适合国情的氰化尾渣处理和处置方案。

（二）黄金氰化尾渣处理技术应用情况

近年来，在国家政策的大力推动下，黄金氰化尾渣处理技术得到发展，氰化尾渣管理与处置取得一定进展。氰化尾渣处理的关键环节为氰化物脱除，目前主要有氰根回收、破坏、转移3类途径（见表1）[4,33]。氰根破坏是应用最广泛的处理方式，利用化学反应将氰化物转化为其他无毒物质，细分为化学氧化法、生物法、高温处理等。氰根回收以酸化回收法为主，也可通过吸附、离子交换等方式回收氰化物。氰根转移是将氰化物从固（液）相转

移至其他相中的脱除方法，以固液分离洗涤法为代表。国内黄金企业实现的氰化尾渣无害化处理工艺（见表2）主要包括湿法处理、火法处理两类[34~36]：前者针对氰化尾矿浆，以化学氧化或洗涤的方式脱除氰化物；后者直接对氰化尾渣进行焙烧，达到氰化尾渣无害化的目的。

国内在氰化尾渣无害化处理技术研究方面进展显著，但也面临一些挑战，突出表现在：渣中氰化物及其他污染物的具体形态尚未完全明晰，制约新技术研发；常用的氯系、硫系化合物等脱氰药剂，在处理过程中容易造成二次污染；氰化尾渣脱氰工艺类型较多，但并非所有工艺的脱氰机理都已明晰，对反应条件实施精细控制存在困难；氰化尾渣综合利用尚处发展初期，新工艺技术及利用途径亟待突破[37]。

五、我国黄金绿色冶金发展潜力分析

（一）有色伴生金冶炼和二次资源循环利用是突破传统黄金资源限制的重要方向

我国黄金资源开发正面临从传统单一金矿开采向多元化资源获取模式转型的根本性调整，既是资源禀赋约束的必然结果，又是绿色冶金理念推动下的战略选择。目前，有色伴生金资源占我国金总储

表1　黄金氰化尾渣中氰化物毒性处理技术的应用范围及特点

脱氰方法		适合处理的氰化尾渣浓度			特点
		高	中	低	
氰根回收	酸化回收法	√			成本低、操作简单，但氰化物脱除不完全，容易有氰化氢气体逸出，存在安全隐患
氰根破坏	碱性氯化法[4]		√	√	可用药剂类型广泛、价格低廉，但氯系物质容易腐蚀设备，逐渐被工业生产淘汰
	H_2O_2氧化法[4]		√	√	产物简单、无二次污染，但药剂消耗量大、成本较高
	因科法[36]	√	√	√	可处理多种类氰化物（如铁氰化物），脱氰效率高、成本低
	O_3氧化法[4]		√	√	反应耗能高、操作设备复杂、成本高，但产物安全无污染
	自然净化法	√			占用场地面积大，处理时间长，无法实现氰化物的彻底脱除
	高级氧化法[33]		√	√	氰化物脱除效率高，但需配套辅助设施
	生物法[4]			√	处理成本低，但工艺建设成本高；处理时间长，仅对低浓度氰化物有效，适用条件苛刻
	高温焙烧法[4]	√			氰化物脱除率可达100%，但能耗大、成本高，产生烟气的二次污染
	电解法[33]		√	√	不产生二次污染，成本相对较高，一次处理不易达标，但可同时回收氰化物和金属
氰根转移	化学沉淀法[4]	√			适合处理金属配合氰化物，但单独处理氰化尾渣效果不佳
	固液分离洗涤法[4]	√			适用于氧化矿型氰化尾渣的工业生产，处理成本低，但后续需对洗脱水进行二次脱氰

表2　国内黄金企业采用的生产脱氰工艺（部分）

企业名称	提金工艺	脱氰工艺
山东招金集团有限公司	金精矿氰化工艺	密闭回收氰根－脱氰浮选－烧制陶瓷工艺[34]
山东黄金冶炼有限公司	金精矿氰化工艺	压滤－洗涤－负压净化回收工艺[35]
山东金创金银冶炼有限公司	金精矿氰化工艺	压滤－洗涤－负压净化回收工艺[35]
赤峰柴胡栏子黄金矿业有限公司	全泥氰化工艺	固液分离洗涤工艺[36]
青海黄金昆仑有限公司	金精矿氰化工艺	固液分离洗涤－因科法脱氰工艺[36]

量的30%以上，主要分布在规模庞大的铜矿、铅锌矿中，如规模亚洲第一、位于江西省上饶市的德兴铜矿。有色伴生金资源具有重要价值：储量规模显优势，可有效缓解我国金矿资源逐渐枯竭的压力；协同开发效益突出，通过与有色金属共同开采，将显著降低综合成本及环境风险；技术创新驱动特征鲜明，富氧底吹造锍捕金等新工艺取得突破，对难处理金矿的适用性得到大幅提升。历史上有色副产金在我国黄金生产中起到关键作用，如1978年有色副产金占我国黄金总产量的62%。近年来，受金矿勘探开发更为深入、政策层面调控等因素的影响，有色副产金产量占比降至20%左右[7]。尽管如此，随着高品质金矿储量减少、有色金属产业规模壮大，伴生金资源的战略价值再度显现。作为呼应，美国纽蒙特矿业公司在远期规划中加强有色伴生金开发利用布局，足以表明对相关发展趋势的前瞻把握[38]。

在有色伴生金冶炼以外，二次资源循环利用是我国黄金工业突破资源限制另一个核心路径[39,40]。电子废弃物成为“城市矿山”的重要组成部分。从资源价值看，每吨废旧手机含金量（270 g）远超一级金精矿标准（100 g），回收价值占电子废弃物总价值的60%以上，而回收成本仅为传统采矿的35%~80%，能耗则降低90%以上。在2030年，若我国手机、电脑回收率达到85%，回收金量将超过进口矿石的含金量[41,42]。这表明，以电子废弃物为主要处理对象的二次资源循环利用，将从补充角色转变为主导力量，能够有效缓解黄金的对外依存，进而构建我国黄金资源供应的新格局。

（二）高端新材料是黄金科技属性彰显下产业升级的重要契机

我国高端新材料发展迅速，在支撑新型工业化建设的基础上，成为黄金工业突破传统商品定位、深度融入科技创新链条、实现产业价值跃升的重大机遇。黄金凭借独特的物理化学特性（导电性、化学稳定性、生物相容性优异，纳米尺度下具有特殊的光学和催化性能），将在高端新材料发展过程中占据重要地位，甚至成为相关产业升级的关键驱动力。国际科学界对黄金新材料保持了极高的关注度，也持续探讨纳米金等材料的开发与应用[43~45]，将促进黄金新材料的应用范围得到进一步拓展[46]。

在电子信息领域，黄金较多应用于高端芯片的互连线路、关键组件。芯片制造尺寸更小、集成度更高，对包括黄金在内的高端材料的纯度、精度、性能等提出更高要求，推动黄金加工技术朝着精细化、高性能方向发展，也催生了新型黄金材料的发展需求。在航空航天装备领域，黄金因其良好的反射率、热管理性能、抗腐蚀性、导电性成为极端环境下关键部件的理想材料，大型太空望远镜的主镜面采用黄金涂层即为代表性案例[47]。近年来，我国发布了重点新材料、未来前沿材料清单，对抗腐蚀性、高延展性（超薄）、高反射率、生物相容性等性能的需求更显迫切，为黄金在更多领域的拓展应用提供直接牵引。为此，黄金工业需要加快基础研究与技术创新，深化“产学研”合作，在高端新材料领域开辟新的发展空间，推动黄金工业朝着高端化转型升级。

（三）智能化转型是黄金工业生产模式革新与效率提升的战略路径

包括黄金工业在内的传统制造业是我国现代化产业体系的基底，智能化成为传统制造业转型升级的主导方向。黄金工业同样面临智能化发展的迫切需求。《有色金属行业智能矿山建设指南（试行）》（2020年）要求，到2026年关键工序数控化率达到70%。在政策推动下，黄金工业在智能矿山建设方面进行了探索与实践。山东黄金集团有限公司成功将三山岛金矿转型为国际一流示范矿山，采用5G、第六代无线网络、工业环网等技术，实现36个应用场景、24个项目的智能化升级，提升了矿山综合运营效率[48]。此外，黄金产品加工同样需要智能化发展，但智能化探索进展缓慢，应用案例较少。整体来看，黄金工业的智能化发展处于“局部应用向系统集成过渡”的关键阶段。

智能化发展不仅是设备和技术的升级，更是生产模式和管理理念的深刻变革。大数据、人工智能、数字孪生等技术，有望重塑黄金工业的生产流程，全面实现生产过程自动化、可视化、智能化管控。正在兴起的材料基因组计划等新型研制模式，打破了传统的“试错式”研发范式，可加速黄金新材料的研发和应用进程，显著提升研发效率和成功率。当然，黄金工业智能化发展面临较大挑战，突

出表现在智能化技术与生产工艺深度融合、数据安全与共享、专业人才培养、技术标准制定等方面[49]。

（四）产业融合集群化是黄金工业生态重构与协同创新的优选方案

国家层面积极推动产业融合集群化发展，这也是促进黄金工业可持续发展、提升行业综合竞争力的关键举措。黄金工业的产业融合集群化不是简单地聚集企业或延伸产业链，而是通过资源共享、要素整合、技术协同、市场联动，实现产业生态的全面重构、创新能力的系统提升。我国黄金工业初步实践了产业融合集群化发展模式，如山东省成立“山东黄金产业联盟”，串联起从矿产开采到首饰制造的链上企业，全面提升了产业链效率[1]。后续，黄金工业的产业融合程度仍有提升空间，与新一代信息技术、新能源、高端装备等国家战略性新兴产业的深度融合亟待加强。

黄金工业、有色金属工业有着悠久的历史渊源和密不可分的内在联系，二者在矿产资源共伴生、生产工艺装备共通、市场需求关联等方面具有高度的耦合性。黄金工业、有色金属工业曾因各自发展重点的阶段性差异，而致各自的管理和发展路径一度呈分离态势。然而，有色伴生金在未来极有可能再次成为我国乃至全球黄金资源的重要补充，资源价值和战略地位将进一步显现。近年来，得益于铜等有色金属产业的蓬勃发展以及富氧底吹造锍捕金、阳极泥高效提金等关键技术的突破升级，有色冶炼副产金的经济性、环保优势再度显现，在国投金城冶金有限责任公司、山东恒邦冶炼股份有限公司、河南中原黄金冶炼厂有限责任公司等大型企业内实现工程化应用[50~52]。相关先进工艺技术对难处理金矿具有极强的适用性，支持对包括金在内的多种有价金属的综合高效回收，有效规避传统氰化工艺伴生的尾渣污染隐患，为破解黄金工业长期面临的资源瓶颈和环保难题提供了切实可行的解决方案。

面向未来，在产业融合集群化发展的趋势下，黄金工业、有色金属工业需基于深厚的历史积淀、紧密的资源技术关联、共同的可持续发展诉求，进一步深化融合、协同发展。这是充分挖掘有色伴生金资源潜力、提升资源保障能力的科学选择，也是推动黄金工业绿色低碳转型、实现高质量和可持续发展的战略路径。

六、我国黄金绿色冶金发展建议

（一）加强黄金氰化尾渣安全利用与“生态回归”大规模消纳

鉴于氰化尾渣环境风险制约黄金工业绿色发展、氰化提金技术仍将长期占据主导地位的现实情况，加强黄金氰化尾渣安全利用与“生态回归”的大规模生态消纳，是破解氰化尾渣困境、实现黄金工业绿色转型的治本之策。在当前及未来相当长的一段时期内，有效治理新增和历史遗留氰化尾渣依然是推动黄金工业绿色发展的核心任务。随着《国家危险废物名录（2025年版）》的修订，氰化尾渣分类处理将是主要的处理策略，以金精矿氰化尾渣为代表的危险废物安全处置和资源化处理亟待突破；对于未列入名录或移除名录的其他氰化尾渣，安全利用和消纳问题依然值得关注。建议从黄金工业顶层设计出发，深入研究并加快制订“国家黄金氰化尾渣安全利用与大规模生态消纳工程技术规范”，系统性推进黄金氰化尾渣生态回填，加快实现氰化尾渣“从哪里来、到哪里去”的大规模生态消纳新模式；在技术规范中明确氰化尾渣分类管控和处理要求，细化不同类型氰化尾渣的贮存、收集、运输要求。在总结成熟的氰化尾渣处理及处置工程的基础上，积极推进氰化尾渣安全利用与大规模生态消纳技术开发和工程实施，拓宽生态消纳途径；重点突破氰化尾渣替代的充填材料和生态回填工程技术，详细规定工程中材料选型、设备配置、过程控制、辅助工程、环保控制等方面的要求，确保技术规范的可操作性和有效性。

（二）加强黄金科技属性开发与高端利用

加强黄金科技属性的开发与利用，是我国制造业提升核心竞争力、巩固在全球价值链中领先地位的关键策略之一。建议在国家层面加大对黄金科技属性开发与应用创新的支持力度，全面提升黄金关联制造业的科技创新水平和高端制造能力。在金新材料方面，加快研制金纳米颗粒/线、金烯（单原子层黄金）等新型纳米材料，探索在催化、光学、电子、生物医学等方向的应用能力，挖掘在绿色能

源转换和存储中的应用潜力；开发适应航空航天、核能、深海探测等极端应用环境的高性能金基合金，提升高端制造领域的自主可控能力；面向高强度、高导电性、高延展性、高反射率、耐腐蚀性等需求的场景，将黄金与碳纤维、陶瓷、聚合物等相结合，研发具有特殊功能的复合材料。在黄金应用场景方面，提升黄金在可穿戴设备、精密仪器、半导体封装、航空航天装备、新一代通信装备、新能源装备中应用的性能及可靠性，增强国内企业在国际高端制造市场上的竞争力；推动黄金与电子信息、生物医药、新能源等新兴产业的深度合作，拓展黄金科技应用的广度和深度，强化我国在全球制造业中的地位。

（三）推进有色金属–黄金产业融合发展

深入推进有色金属–黄金产业融合发展，是挖掘有色冶金伴生金资源潜力、破解难处理金矿开发瓶颈、实现资源高效协同利用的战略性举措，也是推动黄金工业绿色低碳转型、构建循环经济产业链、实现高质量和可持续发展的重要途径。建议发布积极政策，强化有色冶金协同副产金的发展引导和技术攻关，一体化推进有色金属–黄金产业协同和绿色发展，构建互利共赢的产业发展新格局。

可尽快组织制定“国家黄金工业最佳可行技术指南”，推行面向黄金工业的先进适用绿色工程技术。在上游环节，加强常规金矿、有色伴生金及难处理金矿的资源勘探与评估，精准识别有色金属伴生金矿特征，指导“采选冶”技术工艺方案优化。在冶炼环节，结合典型矿物的金品位低、嵌布粒度细等特征，开发冶炼工艺和技术；针对高砷、高硫、高有机碳等问题，开发有色副产金清洁生产技术与工艺，提高金及其他有价金属的综合回收率，降低能耗和排放强度。在下游环节，建立完善的资源循环利用技术体系，突破城市矿产等再生金、有色金属与黄金的废渣及尾矿转化为二次资源等技术，实现高质量的循环利用。此外，建议研究并制定有色金属–黄金产业一体化推进的指导性意见，由中国有色金属工业协会、中国黄金协会就黄金工业发展进行深入协同；在政策层面支持有色金属–黄金产业链融合，鼓励有色金属与黄金企业的战略合作，合理共享技术成果，建立统一的标准体系和信息平台，增强产业链的透明度与协同效应，提高各类资源的配置效率。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 29, 2024; **Revised date:** March 13, 2025

Corresponding author: Chai Liyuan is a professor from the School of Metallurgy and Environment, Central South University, and a member of Chinese Academy of Engineering. His major research field is nonferrous metallurgical environmental engineering. E-mail: lychai@csu.edu.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Harmless Treatment of Cyanide Residues and the Green Development Strategy for Gold Metallurgy” (2023-XZ-67); National Natural Science Found Project (52121004)

参考文献

[1] 王伟. 中国黄金行业科技创新助推新质生产力快速发展探讨 [J]. 中国矿业, 2024, 33(5): 52–57.
Wang W. Exploring the technological innovation in China’s gold industry to boost the rapid development of new quality productive forces [J]. China Mining Magazine, 2024, 33(5): 52–57.

[2] 车贤. 氰化浸金的三大机理及强化工艺研究进展 [J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(7): 174–180.
Che X. Research progress on the three major mechanisms and strengthening processes of cyanide leaching of gold [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2024, 42(7): 174–180.

[3] Zhang Y, Cui M Y, Wang J G, et al. A review of gold extraction using alternatives to cyanide: Focus on current status and future prospects of the novel eco-friendly synthetic gold lixiviants [J]. Minerals Engineering, 2022, 176: 107336.

[4] Han W W, Yang H Y, Tong L L. Cyanide removal for ultrafine gold cyanide residues by chemical oxidation methods [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022, 32(12): 4129–4138.

[5] 韩雯雯, 赵荣欣, 杨洪英, 等. 黄金氰渣尾矿浆脱氰技术综述 [J]. 中国有色冶金, 2023, 52(3): 41–49.
Han W W, Zhao R X, Yang H Y, et al. Review on cyanide removal technologies of gold cyanide residue slurry [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2023, 52(3): 41–49.

[6] 工业和信息化部等八部门关于加快传统制造业转型升级的指导意见 [EB/OL]. (2023-12-28)[2025-02-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923270.htm.
Guiding opinions on accelerating the transformation and upgrading of traditional manufacturing industries by eight ministries and commissions [EB/OL]. (2023-12-28)[2025-02-15]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202312/content_6923270.htm.

[7] 2024 中国国际黄金大会举办 [EB/OL]. (2024-07-31)[2025-02-15]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202407/31/t20240731_39088450.shtml.
2024 China International Gold Conference held [EB/OL]. (2024-07-31)[2025-02-15]. http://www.ce.cn/xwzx/gnsz/gdxw/202407/31/t20240731_39088450.shtml.

[8] 中国黄金行业领军之路 [N]. 中国黄金报, 2024-07-26(02).

Leading path of China's gold industry [N]. China Gold Newspaper, 2024-07-26(02).

[9] 王岩, 王登红, 王成辉, 等. 基于地质大数据的中国金矿时空分布规律定量研究 [J]. 地学前缘, 2024, 31(4): 438–455.
Wang Y, Wang D H, Wang C H, et al. Quantitative research on metallogenic regularity of gold deposits in China based on geological big data [J]. Earth Science Frontiers, 2024, 31(4): 438–455.

[10] World Gold Council. Global gold mining [EB/OL]. (2023-01-01)[2025-02-15]. https://www.gold.org/.

[11] 李堎灏, 焦芬, 吴奕彤, 等. 难处理金矿预处理及金回收技术进展 [J]. 贵金属, 2022, 43(4): 87–96.
Li G H, Jiao F, Wu Y T, et al. Pretreatment and gold extraction status for refractory gold ores [J]. Precious Metals, 2022, 43(4): 87–96.

[12] 许晓阳, 熊明, 蔡创开, 等. 含砷锑硫难处理金矿预处理技术研究进展 [J]. 黄金, 2018, 39(8): 68–72.
Xu X Y, Xiong M, Cai C K, et al. Research progress of pretreatment technology of refractory gold ores containing arsenic, stibium and sulfur [J]. Gold, 2018, 39(8): 68–72.

[13] 南君芳, 苗盛. 含砷难处理金精矿工艺技术研究与实践 [J]. 世界有色金属, 2018 (15): 207–209.
Nan J F, Miao S. Study and practice on technology of refractory gold concentrate containing arsenic [J]. World Nonferrous Metals, 2018 (15): 207–209.

[14] Bland A. The environmental disaster that is the gold industry [EB/OL]. (2023-02-14)[2025-02-15]. https://www.smithsonianmag.com/science-nature/environmental-disaster-gold-industry-180949762/.

[15] 刘强. 中国黄金工业污染场地特征、修复技术现状与发展方向 [J]. 黄金, 2021, 42(11): 85–89.
Liu Q. Characteristics of gold industrial contaminated sites in China and the current status and development trend of remediation technology [J]. Gold, 2021, 42(11): 85–89.

[16] Zhou Y, Ding D, Zhao Y C, et al. Determining priority control toxic metal for different protection targets based on source-oriented ecological and human health risk assessment around gold smelting area [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 468: 133782.

[17] What are the cyanide-free gold recovery methods? [EB/OL]. (2020-12-23)[2025-02-15]. https://www.cnfreereagent.com/news/cyanide-free-gold-recovery-methods/.

[18] 徐景士, 邱学婷, 王元纪. 含砷金矿的湿法除砷 [J]. 化学世界, 1999, 40(10): 518–520.
Xu J S, Qiu X T, Wang Y J. The wet dearsenication of arsenic bearing gold ore [J]. Chemical World, 1999, 40(10): 518–520.

[19] Johnson C A. The fate of cyanide in leach wastes at gold mines: An environmental perspective [J]. Applied Geochemistry, 2015, 57: 194–205.

[20] Hilson G, Monhemius A J. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: What prospects for the future? [J]. Journal of Cleaner Production, 2006, 14(12/13): 1158–1167.

[21] Xu B, Wu J T, Dong Z L, et al. Solution circulation for green and sustainable gold extraction with an integrated low potential thiosulfate leaching-resin adsorption recovery process [J]. Separation and Purification Technology, 2025, 353: 128535.

[22] Dufresne M. Technical report on the railroad-pinion project, Elko County, Nevada, USA [R]. Edmonton: APEX Geoscience Ltd., 2017.

[23] Barrick Gold Corporation, Nevada Gold Mines. Technical report on the cortez complex, Lander and Eureka Counties, State of Nevada, USA [R]. Toronto: Barrick Gold Corporation, 2021.

[24] 王秀美, 郝福来, 张世镖, 等. 生物冶金技术在黄金领域的应用及展望 [J]. 黄金, 2023, 44(9): 84–92.
Wang X M, Hao F L, Zhang S B, et al. Application and prospects of biometallurgical technology in the gold industry [J]. Gold, 2023, 44(9): 84–92.

[25] Jiang T, Chen J, Xu S. Electrochemistry and mechanism of leaching gold with ammoniacal thiosulfate [R]. Sydney: International Mineral Processing Congress, 1993.

[26] 周毅, 蒋文龙, 查国正, 等. 从铅铜冶炼的副产物中回收共伴生贵金属 [J]. 中国有色金属学报, 2022, 32(4):1063–1075.
Zhou Y, Jiang W L, Zha G Z, et al. Recovery of associated precious metals from by-products of lead and copper smelting [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2022, 32(4): 1063–1075.

[27] 邱曼, 黄学雄, 毛益林, 等. 我国金矿资源概况及选冶技术研究进展 [J]. 矿产综合利用, 2023 (2): 106–115.
Qiu M, Huang X X, Mao Y L, et al. General situation of gold resources and research progress of mineral processing and hydrometallurgy technology in China [J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2023 (2): 106–115.

[28] 中华人民共和国环境保护部. 黄金行业氰渣污染控制技术规范 (HJ 943—2018) [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1993.
Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Technical specification for pollution control of cyanide residues in the gold industry (HJ943—2018) [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1993.

[29] 国家危险废物名录(修订稿) [EB/OL]. (2024-01-03)[2025-02-15]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240103_1060504.html.
National catalogue of hazardous wastes (draft revised) [EB/OL]. (2024-01-03)[2025-02-15]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202401/t20240103_1060504.html.

[30] Anning C, Wang J X, Chen P, et al. Determination and detoxification of cyanide in gold mine tailings: A review [J]. Waste Management & Research, 2019, 37(11): 1117–1126.

[31] NI 43-101 technical report on the turquoise ridge complex Humboldt County, Nevada, USA [R]. Toronto: Barrick Gold Corporation, 2024.

[32] Newmont Corporation. Environmental and social impact assessment, summary—Ahafo south project [EB/OL]. [2025-02-15]. https://operations.newmont.com/_doc/operation/ahafo/Environmental% 20and% 20Social% 20Impact% 20Assessment,% 20Summary%20%E2%80%93%20Ahafo%20South%20Project.pdf.

[33] Han W W, Yang H Y, Tong L L. Removal of cyanide in gold cyanide residues through persulfate—Advanced oxidation process [J]. Minerals, 2023. 13(5): 613.

[34] 仲铭. 氰渣铅锌选矿及其含氰废水综合利用研究 [D]. 长沙: 中南大学(硕士学位论文), 2011.
Zhong M. Research on the comprehensive utilization of cyanide

dregs lead-zinc ore dressing and its cyanide-containing wastewater [D]. Changsha: Central South University (Master's thesis), 2011.

[35] 毕廷涛, 何力为, 赵海亮, 等. 某金矿氰化尾矿脱氰试验研究 [J]. 黄金, 2022, 43(10): 82–85.
Bi T T, He L W, Zhao H L, et al. Experimental research on the decyanidation of cyanide tailings from a gold mine [J]. Gold, 2022, 43(10): 82–85.

[36] 费运良, 李哲浩, 兰馨辉, 等. 氰渣回填无害化处理技术试验研究 [J]. 黄金, 2018, 39(6): 65–68.
Fei Y L, Li Z H, Lan X H, et al. Experimental research on non-hazardous treatment of cyanide tailings backfill technique [J]. Gold, 2018, 39(6): 65–68.

[37] 孟文文, 李鹏. 黄金行业尾矿处置政策与综合利用实践 [J]. 黄金科学技术, 2023, 31(6): 1023–1034.
Meng W W, Li P. Tailings disposal policy and comprehensive utilization practice in gold industry [J]. Gold Science and Technology, 2023, 31(6): 1023–1034.

[38] Newmont Corporation. Exploration and projects [EB/OL]. [2025-02-15]. https://operations.newmont.com/exploration-and-projects.

[39] Peydayesh M, Boschi E, Donat F, et al. Gold recovery from e-waste by food-waste amyloid aerogels [J]. Advanced Materials, 2024, 36(19): e2310642.

[40] 柴立元, 柯勇, 王云燕, 等. 大宗难消纳工业固体废物"地球宏循环"生态回归研究 [J/OL]. 中国工程科学[2025-03-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20250312.0914.002.html.
Chai L Y, Ke Y, Wang Y Y, et al. "Earth macro-circulation" of bulk hard-to-dispose industrial solid waste for its ecological return [J/OL]. Strategic Study of CAE, [2025-03-12]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4421.G3.20250312.0914.002.html.

[41] 绿色和平, 中国电子装备技术开发协会. 唤醒沉睡的宝藏: 中国废弃电子产品循环经济潜力报告 [R]. 北京: 绿色和平, 中国电子装备技术开发协会, 2019.
Greenpeace, China Electronics Equipment Technology Development Association. Awakening the sleeping treasure: China's e-waste circular economy potential report [R]. Beijing: Greenpeace, China Electronics Equipment Technology Development Association, 2019.

[42] Do M H, Nguyen G T, Thach U D, et al. Advances in hydrometallurgical approaches for gold recovery from e-waste: A comprehensive review and perspectives [J]. Minerals Engineering, 2023, 191: 107977.

[43] Kashiwaya S, Shi Y C, Lu J, et al. Synthesis of goldene comprising single-atom layer gold [J]. Nature Synthesis, 2024, 3(6): 744–751.

[44] González-Rubio G, Mosquera J, Kumar V, et al. Micelle-directed chiral seeded growth on anisotropic gold nanocrystals [J]. Science, 2020, 368(6498): 1472–1477.

[45] Chen J J, Xie H, Liu L Z, et al. Strengthening gold with dispersed nanovoids [J]. Science, 2024, 385(6709): 629–633.

[46] Zhang S, Kong N, Wang Z Z, et al. Nanochemistry of gold: From surface engineering to dental healthcare applications [J]. Chemical Society Reviews, 2024, 53(8): 3656–3686.

[47] NASA. Webb mission overview [EB/OL]. (2021-12-25)[2025-02-15]. https://science.nasa.gov/mission/webb/.

[48] 山东黄金集团打造全球黄金矿业数字化转型先锋 [EB/OL]. [2025-02-15]. https://www.zyny.org.cn/newsinfo/4612107.html.
Digital transformation pioneer of Shandong Gold Group in the global gold mining industry [EB/OL]. [2025-02-15]. https://www.zyny.org.cn/newsinfo/4612107.html.

[49] 张冬阳. 基于 IPDRR 框架的矿山企业数据安全治理体系研究 [J]. 中国煤炭, 2023, 49(11):80–86.
Zhang D Y. Research on data security governance system of mining enterprises based on the IPDRR framework [J]. China Coal, 2023, 49(11): 80–86.

[50] 张宏斌, 杜武钊, 李林波, 等. 复杂金精矿"三连炉"火法捕金生产实践 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2022 (2): 34–39.
Zhang H B, Du W Z, Li L B, et al. Plant practice of gold-catching from refractory gold concentrates by pyrometallurgical process in "triple consecutive furnace" [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2022 (2): 34–39.

[51] 郭学益, 王松松, 王亲猛, 等. 造锍捕金机理及富氧熔炼过程贵金属分配行为 [J]. 中国有色金属学报, 2020, 30(12): 2951–2962.
Guo X Y, Wang S S, Wang Q M, et al. Mechanism of gold collection in matte and distribution behavior of precious metals in oxygen-enriched smelting process [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2020, 30(12): 2951–2962.

[52] 党晓娥, 孟裕松, 王璐, 等. 黄金冶炼两大新技术应用现状与发展趋势探讨 [J]. 黄金科学技术, 2017, 25(4): 113–121.
Dang X E, Meng Y S, Wang L, et al. Application status and development trend of two new gold extraction technologies [J]. Gold Science and Technology, 2017, 25(4): 113–121.