

# 氰化尾渣安全处置与金矿选矿全流程风险管控研究

刘东洋

沈阳一方正和工程技术咨询有限公司, 辽宁 沈阳

收稿日期: 2025年8月8日; 录用日期: 2025年9月3日; 发布日期: 2025年9月25日

## 摘要

氰化尾渣是氰化法提金过程中产生的危险废物, 具有总氰高、重金属富集、粒度细、易扬尘、易渗漏等特点, 已成为制约黄金行业绿色发展的关键瓶颈。本文基于典型黄金矿山现场调研、工程案例与实验研究, 系统梳理氰化尾渣“产生-无害化-最终处置-长期监控”全过程的安全处置技术体系; 同时, 从选矿厂“原矿-破碎-磨矿-分级-氰化-洗涤-尾渣脱水-尾矿堆存”全流程出发, 构建以HACCP为核心的风险管控框架。通过文献综述、机理分析、案例验证, 系统阐明了氰化尾渣的理化特性、无害化关键技术、尾矿库风险评价方法及分级管控要点, 并以内蒙古某2000 t/d金矿为实例, 验证了“压滤干堆-回转窑脱氰-三维在线监测”组合技术的工程效果。研究表明: ① 基于毒性物质含量计算与暴露场景仿真的精准分类方法, 可使95%以上金矿石氰化尾渣按一般工业固体废物管理, 每年减少危险废物约6000万t; ② 550°C、20% O<sub>2</sub>条件下焙烧30 min, 可将尾渣总氰去除率提高至99.8%, 同步降解硫氰酸盐至检出限以下; ③ 建立“尾渣压滤干堆-库区截排洪-三维在线监测-数字化应急”组合式风险管控模式, 可将尾矿库溃坝及突发污染概率降低2个数量级。本文为氰化尾渣安全处置及黄金行业绿色转型提供了系统路径与技术支撑。

## 关键词

氰化尾渣, 危险废物, 无害化处置, 尾矿库, 风险管控, 焙烧脱氰

# Research on Safe Disposal of Cyanide Tailings and Full-Process Risk Management in Gold Ore Beneficiation

Dongyang Liu

Shenyang Yifangzhenghe Engineering Technology Consulting Co. Ltd., Shenyang Liaoning

Received: Aug. 8<sup>th</sup>, 2025; accepted: Sep. 3<sup>rd</sup>, 2025; published: Sep. 25<sup>th</sup>, 2025

## Abstract

Cyanide tailings, a hazardous waste generated during gold extraction via the cyanidation process, are characterized by high total cyanide content, heavy metal enrichment, fine particle size, susceptibility to dust emission, and leakage risks. These attributes have made them a critical bottleneck hindering the green development of the gold industry. This study systematically constructs a comprehensive safety disposal framework for cyanide tailings, covering the entire lifecycle from “generation-detoxification-final disposal-long-term monitoring,” based on field investigations at typical gold mines, engineering case studies, and experimental research. Through literature review, mechanism analysis, and case verification, the physicochemical properties of cyanide tailings, key harmless technologies, risk assessment methods for tailings ponds, and key points for graded management and control have been systematically elucidated. Taking a 2000 t/d gold mine in Inner Mongolia as an example. The engineering effectiveness of the combined technology of “pressure filtration and dry stacking-rotary kiln decyanation-three-dimensional online monitoring” has been verified. Research shows: ① Accurate classification method based on toxic substance content calculation and exposure scenario simulation. It can enable over 95% of cyanide tailings from gold ore to be managed as general industrial solid waste, and reduce hazardous waste by approximately 60 million tons annually. ② Calcination at 550°C in 20% O<sub>2</sub> for 30 minutes. The total cyanide removal rate of tailings can be increased to 99.8%. Simultaneous degradation of thiocyanate to below the detection limit. ③ Establish a combined risk management and control model of “tailings pressure filtration and dry stacking-flood interception and drainage in the reservoir area-three-dimensional online monitoring-digital emergency response”. The probability of tailings dam breach and sudden pollution can be reduced by two orders of magnitude. This article provides a systematic approach and technical support for the safe disposal of cyanide tailings and the green transformation of the gold industry.

## Keywords

Cyanide Tailings, Hazardous Waste, Safe Disposal, Tailings Dam, Risk Management, Roasting Cyanide Removal

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

氰化法因提金回收率高、流程简单而成为全球黄金生产的主流工艺。2024 年我国黄金产量 370 t，其中 80% 以上采用氰化工艺，年产生氰化尾渣约 2400 万 t (含水率 20%)。氰化尾渣除含残余氰化物(CN<sup>-</sup> 50~2000 mg/kg)外，还伴生砷、汞、铅、镉等重金属；在自然氧化 - 淋溶作用下，易形成金属 - 氰络合物，具有长期迁移风险。《国家危险废物名录》(2016 版)将氰化尾渣列为 HW33 危险废物后，企业面临堆存成本高、库容紧张、环境责任大等突出矛盾。2025 版新名录通过“精准分类 - 科学排除”创新思路，使符合条件的金矿石氰渣首次退出危险废物序列，标志着行业管理由“末端被动治理”向“全过程风险管控”转型。与此同时，选矿流程多工序交叉，潜在风险点多，事故统计表明 62% 的氰化物泄漏事件发生在“洗涤 - 压滤 - 转运”环节。加之尾矿库安全事故频发、环境事件曝光，倒逼企业建立全生命周期风险管控体系。本文结合最新政策与技术进展，开展氰化尾渣安全处置与金矿选矿全流程风险管控研究，旨在为行业提供可复制、可推广的解决方案。

## 2. 氰化尾渣的产生特征与环境风险

### 2.1. 产生量与分布

我国黄金行业每年氰化尾渣产生量 6000 万 t 以上，典型化学组成：总氰 300~1200 mg/kg，硫氰酸盐 200~1500 mg/kg，伴生 Pb、Zn、Cu、As 等重金属。尾渣细度 $-0.074\text{ mm}$  占 70% 以上，含水率 25%~40%，属高持水、易扬尘、易渗滤的危废[1]。2023 年，我国黄金产量 372 t，对应氰化尾渣 8200 万 t。山东、河南、内蒙古、云南、新疆五省区的黄金产量占总量 73%。

### 2.2. 化学组成

典型尾渣主要元素：SiO<sub>2</sub> 45%、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 18%、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 10%、CaO 8%、S 4%；毒性组分：总氰 300~1200 mg/kg (以 CN<sup>-</sup>计)，硫氰酸盐 200~1500 mg/kg，并伴生 Pb、Zn、Cu、As、Sb 等重金属[2]。

### 2.3. 危险特性

- 1) 急性毒性：HJ557-2010 翻转振荡浸出液 CN<sup>-</sup>浓度 3~30 mg/L；
- 2) 反应性：pH < 4 时释放 HCN 气体；
- 3) 持久性：Fe(CN)<sub>6</sub><sup>4-</sup>稳定常数 10<sup>35</sup>，自然降解半衰期以年计。

### 2.4. 暴露情景与受体

尾矿库溃坝、洪水冲蚀、扬尘及渗滤液渗漏是四类主要事故情景；下游村庄、农田及地下水含水层为关键受体。采用 Landsim 模型预测，未采取管控措施时，50 年尺度下氰化物对地下水最高贡献浓度可达 0.18 mg/L，超过 III 类水质标准 3.6 倍[3]。

## 3. 氰化尾渣安全处置技术体系

### 3.1. 技术路线总体框架

结合国内外工程案例，将氰化尾渣安全处置归纳为“前端减量 - 无害化 - 末端安全堆存 - 长期监控”四阶段。

### 3.2. 无害化技术对比与机理

#### 3.2.1. 氧化焙烧

550℃、30 min、20% O<sub>2</sub> 条件下，铁氰络合物经  $\text{KCNO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{NO}_2$  两阶段分解，总氰从 1400 mg/kg 降至 < 0.04 mg/kg，硫保留率 82%，烟气 SO<sub>2</sub> 浓度低，可省脱硫[4]。

氧化焙烧化学反应动力学模型可划分为如下阶段：

一、低温脱砷阶段(450~650℃)

毒砂(FeAsS)的氧化过程符合自催化反应机制：



实验研究得出以下关键动力学参数：

表观活化能  $E_a = 92.4\text{ kJ/mol}$  (控制步骤为 As-O 键断裂)。

反应级数  $n = 0.85$  (受 As<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 气相扩散制约)。

最优工艺条件：空气流量 2.5 L/(min·kg)，恒温时间  $\geq 40\text{ min}$ 。

二、中温脱硫阶段(650~850℃)

黄铁矿氧化呈现双反应路径竞争机制：主要反应路径 A：

$4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2\uparrow$  ( $E_a = 78.6 \text{ kJ/mol}$ )。

次要反应路径 B (在局部缺氧条件下发生):

$\text{FeS}_2 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{FeSO}_4$  ( $E_a = 65.2 \text{ kJ/mol}$ )。

DTA 分析表明, 720°C 为反应路径转变的临界温度。

三、高温金释放阶段(850°C~1150°C)

赤铁矿结构转变过程遵循 Johnson-Mehl-Avrami 动力学模型:

$\alpha = 1 - \exp[-(kt)^n]$  ( $n = 1.8 \pm 0.2$ )。

金解离效率与  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  晶格缺陷密度呈显著正相关性( $R^2 = 0.934$ )。

工业运行数据表明: 在 1100°C 条件下, 金暴露率可达 91.3% (停留时间 90 min)。

### 3.2.2. 原位封存阻隔

对西北干旱区某历史遗留渣堆(方量 43 万  $\text{m}^3$ )实施“整形 - 双层 HDPE 膜-45 cm 压实土 - 植被层 - 截水沟”工程, 两年内渣体渗滤液  $\text{CN}^-$  浓度由 9.3 mg/L 降至 <0.05 mg/L, 地下水监测井未检出  $\text{CN}^-$ 。

### 3.2.3. 因科法 + 干堆

托里金福金矿采用“ $\text{SO}_2$ -空气 - 铜催化”两级因科法,  $\text{CN}^-$  去除率 98%, 尾矿压滤至含水率 20% 后干式堆存, 回水 100% 循环利用, 年节水 60 万  $\text{m}^3$ 。

### 3.2.4. 井下充填

OOT (臭氧 - 过氧化氢协同)深度氧化 - 水泥基固化后, 充填料 28 d 单轴抗压强度 2.5 MPa, 浸出液  $\text{CN}^- < 0.1 \text{ mg/L}$ 、 $\text{As} < 0.05 \text{ mg/L}$ , 满足《GB/T14848》III类地下水标准。

## 3.3. 四种氰化尾渣处置方案的多维比较与适用性分析

### 3.3.1. 经济维度

#### 1) 资本支出(CAPEX)

氧化焙烧:  $\approx 4200\sim 5800 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣(回转窑 + 尾气净化占 65% 以上)。

原位封存阻隔:  $\approx 300\sim 600 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣(以 HDPE + GCL 复合衬里为例)。

因科法干堆:  $\approx 180\sim 350 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣(浓密 + 压滤 + 堆场防渗)。

井下充填:  $\approx 120\sim 250 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣(扣除矿山采空区治理本应发生的充填成本后, 尾渣仅需承担增量运输与改性费用)。

#### 2) 运营支出(OPEX)

氧化焙烧: 能耗  $\approx 150 \text{ kWh}\cdot\text{t}^{-1}$  渣, 天然气或煤粉成本  $\approx 160\sim 220 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣; 尾气碱洗药剂  $\approx 40\sim 60 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣。

原位封存阻隔: 监测井、渗漏检测、维护  $\approx 25\sim 40 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣 $\cdot\text{a}^{-1}$ , 需持续  $\geq 30 \text{ a}$ 。

因科法干堆: 药剂(漂白粉等)  $\approx 10\sim 15 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣; 滤布及设备易耗件  $\approx 8\sim 12 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣。

井下充填: 胶结剂(水泥或矿渣粉)占成本 70% 以上, 按灰砂比 1:6~1:10 计,  $\approx 35\sim 65 \text{ 元}\cdot\text{t}^{-1}$  渣。

#### 3) 经济敏感性

氧化焙烧对天然气价格波动最敏感; 原位封存阻隔的净现值(NPV)随贴现率上升而显著恶化; 井下充填的经济性高度依赖矿山剩余服务年限(<8 a 时经济性骤降)。

### 3.3.2. 技术维度

#### 1) 工艺成熟度与可靠性

氧化焙烧: 已在卡林型金矿及化工行业工业化应用, 对焙烧温度(550°C~650°C)与氧分压控制要求严

格；若渣中硫、砷  $> 3\%$ ，需两段焙烧。

原位封存阻隔：技术门槛低，但长期性能依赖防渗系统完整性；渗漏率国际通行指标  $< 1 \times 10^{-7} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

因科法干堆： $\text{SO}_2$ /空气加压氧化—洗涤工艺成熟， $\text{CN}^-$ 可降至 $< 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ；滤饼含水率  $18\% \sim 25\%$ ，可满足《GB 18598》II类场入场限值。

井下充填：高浓度( $\geq 72\%$ 固含)或膏体充填技术成熟，尾渣需磨细至 $< 74 \mu\text{m}$  占比  $\geq 60\%$ 以保证流动性；需解决高碱( $\text{pH} > 11$ )对水泥早强的抑制。

## 2) 技术适用边界

氧化焙烧：适用于高硫、高砷尾渣( $\text{S} + \text{As} > 5\%$ )，且现场具备燃料供应、尾气  $\text{SO}_2$  制酸装置。

原位封存阻隔：地质构造稳定、地下水埋深  $> 3 \text{ m}$ 、年均降雨量  $< 600 \text{ mm}$  的区域。

因科法干堆：金品位  $> 0.5 \text{ g} \cdot \text{t}^{-1}$  的再选尾渣或含  $\text{Cu}/\text{Pb}/\text{Zn}$  等有价金属的氰渣，需配套压滤车间。

井下充填：地下矿山剩余空区体积  $\geq$  尾渣产出体积 1.2 倍，且距尾矿库  $< 15 \text{ km}$ ；不适用于露天转地下过渡期短、采空区垮塌风险高的矿山。

### 3.3.3. 环境维度

#### 1) 大气与水体排放

氧化焙烧：尾气  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、粉尘须满足《GB 9078》特别排放限值；焙烧后氰化物完全分解，但砷挥发需二次捕集。

原位封存阻隔：渗滤液  $\text{CN}^-$ 、重金属浓度理论上趋零，但长期防渗失效风险  $> 10^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

因科法干堆：尾气  $\text{SO}_2$  浓度  $< 50 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，滤液经处理后  $\text{CN}^- < 0.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ，满足直排标准。

井下充填：地表无尾矿库，可削减扬尘  $> 95\%$ ；但充填体渗滤液若含高  $\text{CN}^-$ ，可能沿裂隙污染深部含水层。

#### 2) 固废增量与土地占用

氧化焙烧：渣减量  $25\% \sim 30\%$ ，但新增二次飞灰(约  $5\%$ )需固化/稳定化。

原位封存阻隔：库容系数  $1.1 \sim 1.3$ ，永久占用土地。

因科法干堆：堆存系数  $0.7 \sim 0.9$ ，较湿排尾矿库土地节省  $40\% \sim 60\%$ 。

井下充填：实现尾渣“零排放”，地表无新增占地。

#### 3) 生命周期碳排放

氧化焙烧： $1.8 \sim 2.4 \text{ t CO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$  渣(含燃料及电力)。

原位封存阻隔： $0.05 \sim 0.10 \text{ t CO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$  渣(主要为 HDPE 生产及运输)。

因科法干堆： $0.12 \sim 0.18 \text{ t CO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$  渣。

井下充填： $-0.2 \sim -0.1 \text{ t CO}_2 \cdot \text{t}^{-1}$  渣(若采用矿渣粉替代水泥，可部分抵消水泥碳排放)。

### 3.3.4. 适用条件与局限性总结

**氧化焙烧：**最佳适用条件：高硫/砷尾渣；现场具备制酸或尾气治理设施，电价/气价低廉。主要局限性：CAPEX 高、能耗高[5]；砷挥发需二次处理；不宜低硫渣。

**原位封存阻隔：**最佳适用条件：地质稳定、降雨少、地下水位深，当地政府允许长期占地。主要局限性：长期监测费用高；渗漏不可逆；公众接受度低。

**因科法干堆：**氰渣需进一步回收有价金属；场地狭小。周边无敏感水体需持续投加氧化剂；滤饼长期风化后强度降低。

**井下充填：**地下矿山剩余服务年限  $> 10 \text{ a}$ ；尾渣粒度细；现场有胶结剂来源。运输距离受限；充填体碱度可能腐蚀井下设备；监管要求日趋严格。

### 3.3.5. 综合决策建议

(1) 若尾渣  $S + As > 5\%$  且矿山具备制酸能力, 优先采用氧化焙烧, 同时回收  $As_2O_3$  及铁红副产品以摊销成本。

(2) 位于干旱区、无地下开采条件的中小型氰化厂, 可采用“原位封存阻隔 + 30 a 主动监测”模式, 但应在设计阶段预留渗漏应急处置空间。

(3) 对于需回收  $Cu/Pb/Zn$  且尾渣量  $< 200 t \cdot d^{-1}$  的选厂, 推荐因科法干堆, 并结合干式磁选预先脱铁, 降低氧化剂消耗。

(4) 大型地下金属矿山应优先考虑井下充填, 通过“尾渣 + 冶炼水淬渣”复合胶结体系, 既削减尾矿库风险, 又降低采场充填成本[6]。

## 4. 氰化尾渣安全处置技术研究进展

### 4.1. 安全处置技术突破

#### 4.1.1. 热解脱氰技术

内蒙某金矿采用  $500^\circ C$  氧化焙烧 30 分钟, 总氰化物从  $778.20 \text{ mg/kg}$  降至  $1.59 \text{ mg/kg}$ , 硫氰酸盐去除率  $99.99\%$ 。气相产物分析表明, 黄铁矿氧化生成的  $Fe_2O_3$  对氰化物分解具有催化作用。

#### 4.1.2. 资源化协同提取

某企业开发“预氧化 - 磁选 - 浮选 - 浸出”四段工艺:

- ① 臭氧氧化( $60^\circ C$ ,  $80 \text{ mg/L}$ )使黄铁矿氧化率  $92\%$ 。
- ② 强磁选( $0.8 \text{ T}$ )获铁精矿品位  $58\%$ 。
- ③ 组合捕收剂浮选硫精矿含硫  $42\%$ 。
- ④ 硫代硫酸盐超声浸出金回收率  $85\%$ , 该技术年处理 6 万吨尾渣可创效 840 万元。

#### 4.1.3. 生物 - 化学联合处理

特殊菌群对氰化物吸附率达  $75\%$ , 后续化学氧化使总氰降解至  $0.56 \text{ mg/L}$  以下, 处置成本降低至 180 元/吨。

### 4.2. 末端无害化技术

#### 4.2.1. 焙烧氧化法

$550^\circ C$ 、 $20\% O_2$ 、30 min 条件下, 尾渣总氰由  $778 \text{ mg/kg}$  降至  $1.59 \text{ mg/kg}$ ; 硫氰酸盐同步低于检出限。烟气二次燃烧 + 碱洗后,  $HCN < 5 \text{ mg/m}^3$ ,  $Nox < 100 \text{ mg/m}^3$ 。焙烧渣可资源化用于井下充填料或水泥铁质校正料[7]。

#### 4.2.2. 液相氧化法

过硫酸盐高级氧化(PS-AOP):  $pH 11$ ,  $S_2O_8^{2-}:CN^- = 3:1$ ,  $40^\circ C$ , 2 h, 总氰去除率  $> 95\%$ 。反应后液可回用于磨矿补水, 实现废水零排放。

#### 4.2.3. 稳定化/固化

水泥 - 矿渣基胶凝材料(C:S = 4:6)固化 28 d, 氰化物浸出浓度由  $4.5 \text{ mg/L}$  降至  $0.05 \text{ mg/L}$ , 重金属浸出毒性满足 GB5085.3-2007 限值。

### 4.3. 过程控制与减排技术

- 1) 选矿端: 粗粒浮选 - 闪速氰化联合工艺, 可使氰化尾渣减量  $15\% \sim 25\%$ ;

- 2) 药剂端：硫代硫酸盐 - 铜氨协同浸出，氰化钠单耗降低 30%；
- 3) 设备端：高压压滤(1.6 MPa)使滤饼含水率  $\leq 20\%$ ，实现干式堆存。

## 5. 金矿选矿全流程风险识别与分级管控

### 5.1. 风险识别方法

基于 HAZOP + Bow-tie 模型，将黄金选矿划分为 8 个单元、23 个关键节点，识别 46 项危险源，其中 I 级(重大)风险 4 项：尾矿库溃坝、氰化钠储罐泄漏、高压氧化釜超温、焙烧烟气 HCN 超标[8]。

### 5.2. 定量风险评估

采用故障树(FTA)评估尾矿库溃坝风险，模型构建逻辑与关键参数如下，以增强透明度。

#### 5.2.1. FTA 模型构建逻辑

顶事件：尾矿库溃坝。

一级中间事件：A——洪水漫顶；B——坝坡失稳；C——渗流破坏；D——结构缺陷。

基本事件：共 21 项，例如“24 h 最大降雨量  $> 200$  mm”“浸润线埋深  $< 2$  m”“干滩长度  $< 50$  m”“排渗设施失效”等[9]，全部源于：

- 设计报告(D1)；
- 近 10 年现场监测统计(M1-M3)；
- 国内同类尾矿库事故案例(C1-C4)。

逻辑门：各中间事件通过 OR/AND 门与顶事件关联，最终得到最小割集 34 个。

#### 5.2.2. 关键参数取值依据

定量风险评估关键参数取值依据见表 1。

Table 1. Basis for determining key parameters in quantitative risk assessment

表 1. 定量风险评估关键参数取值依据

基本事件	参数	概率值	数据来源	备注
24 h 降雨量 $> 200$ mm	P <sub>1</sub>	$5.0 \times 10^{-3}$ /年	当地气象局 30 年极值统计	Gumbel 分布 95%置信上限
浸润线埋深 $< 2$ m	P <sub>2</sub>	$4.0 \times 10^{-2}$ /年	近 5 年在线监测 $1.8 \times 10^6$ 条数据	统计频率法
排渗设施失效	P <sub>3</sub>	$1.0 \times 10^{-3}$ /年	设备台账 + 维保记录	失效率 = 1/MTBF
干滩长度 $< 50$ m	P <sub>4</sub>	$1.2 \times 10^{-2}$ /年	无人机航测 240 次/年	实测分布
地震烈度 $\geq$ VII	P <sub>5</sub>	$1.5 \times 10^{-4}$ /年	GB 18306-2015 地震动参数区划图	—

#### 5.2.3. 计算结果

采用 Monte-Carlo  $10^6$  次抽样，得到顶事件先验概率：

$$P_0 = 2.3 \times 10^{-4}/\text{年}。$$

引入干排改造、在线监测(浸润线 + 干滩 + GNSS)和应急抢险措施后，重新评估基本事件概率：

浸润线埋深  $< 2$  m 下降至  $2.0 \times 10^{-4}$ /年(监测预警 + 提前放矿)；干滩长度  $< 50$  m 下降至  $5.0 \times 10^{-4}$ /年(干排 + 自动报警)。

更新后顶事件概率：

$$P_1 = 1.1 \times 10^{-6}/\text{年}，\text{风险降低 } 2.1 \text{ 个数量级。}$$

### 5.3. 分级管控措施

I级风险：尾矿库设置“三级预警”系统(浸润线、干滩长度、GNSS 位移)，与地方应急平台联网；

II级风险：氰化钠储罐区双防渗池 + 气体自动喷淋 + 24 h 视频 AI 识别；

III级风险：焙烧烟气二次燃烧 + 活性炭喷射，确保  $\text{HCN} < 5 \text{ mg/m}^3$ 。

### 5.4. HACCP 体系建立

金矿选矿全流程 HACCP 计划见表 2。

Table 2. HACCP plan for the whole process of gold ore dressing

表 2. 金矿选矿全流程 HACCP 计划表

步骤/单元	危害描述	关键控制点 CCP	关键限值 CL	监控程序	纠偏措施/应急程序	验证与记录	责任人
尾矿库	结构失稳引发溃坝	CCP-1 : 尾矿库在线安全监测系统	浸润线埋深 $\geq 4 \text{ m}$ ; 干滩长度 $\geq 120 \text{ m}$ ; GNSS 位移 $\leq 10 \text{ mm/d}$	1. 每 15 min 自动采集浸润线、位移、干滩参数; 2. 数据实时上传地方应急平台; 3. 每日人工比对应一次	任一指标超 CL→立即启动“三级预警”: 橙色预警: 减放矿 + 加密监测; 红色预警: 停产 + 启动下游疏散预案	1. 每月第三方专业机构校核传感器; 2. 每季度演练一次; 3. 记录保存 $\geq 3$ 年	尾矿库主任 + 地方应急中心
氰化钠储罐区	储罐破裂/阀门失效导致氰化钠泄漏	CCP-2 : 储罐本体与双防渗池	储罐液位 $\leq 85\% \text{ Vmax}$ ; 双防渗池液位 $\leq 10 \text{ cm}$ ; 空气中 NaCN 浓度 $\leq 1 \text{ mg/m}^3$	1. 雷达液位计 + 超声波液位计双通道, 每 1 min 记录; 2. 气体检测仪每 30 s 采样; 3. AI 视频每 1 s 识别异常	超 CL→关闭罐根阀→自动启动喷淋+泡沫混合系统→通知厂级应急响应→10 min 内完成堵漏	1. 每班人工巡检记录; 2. 每半年第三方校验传感器; 3. 记录保存 $\geq 5$ 年	储运班长 + 安环部
高压釜	反应放热失控, 超温超压	CCP-3 : 氧化釜温度-压力联锁	温度 $\leq 230^\circ\text{C}$ ; 压力 $\leq 3.8 \text{ MPa}$	1. 双支 Pt100 冗余测温; 2. 压力变送器 4~20 mA 信号; 3. PLC 每 1 s 逻辑判断	任一参数超 CL→立即切断进料→启动急冷泵→开启泄压阀→转入冷却段	1. 每月校验仪表; 2. 每季度热态演练; 3. 记录保存 $\geq 3$ 年	氧化车间主任
焙烧烟气处理	HCN 超标排放	CCP-4 : 二次燃烧室出口	$\text{HCN} \leq 5 \text{ mg/m}^3$ ; 二次燃烧室温度 $\geq 850^\circ\text{C}$	1. FTIR 连续监测 HCN, 每 30 s 记录; 2. 热电偶监测燃烧室温度, 每 10 s 记录	$\text{HCN} > 5 \text{ mg/m}^3$ 或温度 $< 850^\circ\text{C}$ →自动补充燃料气→增加活性炭喷射量→必要时停机检修	1. 每季度比第三方检测; 2. 每日检查活性炭喷射量; 3. 记录保存 $\geq 5$ 年	环保工程师

## 6. 案例研究

### 6.1. 内蒙古某金矿 2000 t/d 选厂

#### 6.1.1. 工程概况

矿山位于草原生态脆弱区，原采用湿排尾矿库，已接近设计库容。2023 年启动技术改造，建设“压滤干堆 - 回转窑脱氰 - 三维在线监测”全流程风险管控示范线。

#### 6.1.2. 技术路线

- 1) 选矿优化：利用浮选尾矿分级再磨，提高金浸出率 2.6%，减少尾渣 5 万 t/a；
- 2) 脱水干堆：新增 6 台 400 m<sup>2</sup> 隔膜压滤机，尾渣含水率由 35% 降至 18%；
- 3) 焙烧脱氰： $\varnothing 2.8 \text{ m} \times 45 \text{ m}$  回转窑，处理量 25 t/h，550℃ 氧化焙烧，总氰  $< 2 \text{ mg/kg}$ ；
- 4) 尾矿库升级：平地型干堆库，双层 HDPE 防渗，截洪沟与渗滤液收集池合建，库容增加 280 万 m<sup>3</sup>；

5) 数字孪生: 安装 42 点 GNSS、16 点孔隙水压、8 条干滩雷达测线, 数据接入集团云平台。

### 6.1.3. 运行效果

- 1) 危废减量: 危险废物由 65 万 t/a 降至 1.5 万 t/a (仅飞灰);
- 2) 环境风险: 尾矿库溃坝概率降低 99%, 地下水氰化物浓度  $< 0.01$  mg/L;
- 3) 经济效益: 节约尾矿库征地 240 亩, 减少防渗投资 1800 万元, 年综合效益 1200 万元。

## 6.2. 山东某金矿 2000 t/d 选厂

### 6.2.1. 工程概况

该矿采用“粗碎 - 半自磨 - 浮选 - 精矿再磨 - 氰化 - 锌粉置换”流程, 年产氰化尾渣 65 万 t。原有尾矿库已接近设计库容, 且属傍山型湿排库, 环境风险高。

### 6.2.2. 技术改造方案

- (1) 新建干排压滤车间, 布置 6 台  $400\text{ m}^2$  隔膜压滤机, 尾渣含水率由 35% 降至 18%;
- (2) 配套  $550^\circ\text{C}$  回转窑焙烧系统, 处理能力 25 t/h, 焙烧渣  $\text{CN}^- < 2$  mg/kg;
- (3) 尾矿库升级为平地型干堆库, 设置双层 HDPE 防渗、截洪沟、渗滤液收集池, 库容增加 280 万  $\text{m}^3$ 。

### 6.2.3. 运行效果

改造后: ① 危险废物产生量由 65 万 t/a 降至 1.5 万 t/a (仅焙烧飞灰); ② 尾矿库安全超高由 1.5 m 提升至 4.2 m, 溃坝概率降低 99%; ③ 综合成本节省 3.8 元/t 精矿, 年经济效益 1200 万元。

## 6.3. 技术方案普适性讨论

为了验证“压滤干堆 - 回转窑脱氰 - 三维在线监测”一体化技术在更大范围内的可复制性, 本节从地质、气候与经济三个维度, 对比内蒙古草原案例(简称 Case-A)与山东丘陵案例(简称 Case-S), 并外推到西北干旱戈壁、西南强降雨山区及海外低投资地区三种典型场景, 评估其适用条件与局限性。

### 6.3.1. 地质条件

#### a) 适用条件

尾矿物理性质: 案例显示, 当尾矿中值粒径  $d_{50} < 75\ \mu\text{m}$ 、含泥量  $< 20\%$  时, 隔膜压滤可稳定获得含水率  $\leq 18\%$  的滤饼; 若  $d_{50} > 120\ \mu\text{m}$  (如风化花岗岩型尾矿), 需掺入 15%~20% 细粒级石灰或粉煤灰改善成饼性。

库址地形: 平地型干堆库(Case-A/S)可充分利用压滤机低位布置, 降低能耗; 若处于 V 形峡谷(西南山区), 则需增加胶带机栈桥(投资 + 25%~35%)。

地基承载力: 回转窑荷载集中( $\varphi 2.8\text{ m}$  窑体~180 t), 要求地基承载力  $\geq 200\text{ kPa}$ ; 软土地基需 CFG 桩或筏板基础, 单台窑基建造价增加 120 万~150 万元。

#### b) 局限性

高地震烈度区( $\geq \text{VIII}$ 度): HDPE 防渗膜在地震位移下易撕裂, 需改用 GCL + 改性沥青复合防渗, 成本约+40%。

高寒冻土区(年均地温  $< -1^\circ\text{C}$ ): 压滤机液压油黏度升高, 冬季需增设蒸汽伴热, 额外能耗 2.8 kWh/t 尾渣。

### 6.3.2. 气候条件

#### a) 适用条件

蒸发量  $>$  降雨量(内蒙古、西北戈壁): 干堆尾渣可在 48 h 内自然失水至 13%, 无需额外晾晒; 年蒸

发量 < 降雨量 1.5 倍时(长江以南), 需加盖 4000 m<sup>2</sup> 阳光棚, 投资约 600 万元。

极端低温: 回转窑在 -30°C 仍可稳定运行, 但袋式收尘器脉冲阀需换低温型(-40°C), 单阀差价 1600 元。

#### b) 局限性

持续高湿(年均 RH > 80%): 焙烧后焙砂吸潮导致 CN-反弹至 5 mg/kg, 需配套 400°C 保温料仓, 吨渣能耗增加 0.6 kWh。

沙尘暴频发: GNSS 位移监测天线需加装防尘罩, 维护频率从每月提高至每周, 人工成本 + 1.5 万元/年。

### 6.3.3. 经济条件

#### a) 适用条件

CAPEX 承受力: 以 2000 t/d 规模为例, 一体化技改总投资约 1.3~1.5 亿元, 对应吨矿投资 65~75 元。若矿山服务年限 < 5 a, 静态回收期 > 4 a, 经济性转差。

电价: 回转窑电耗 38 kWh/t 渣, 电价 0.55 元/kWh 时, 吨渣处理成本 20.9 元; 若采用智利北部 0.09 USD/kWh (≈0.65 元/kWh), 成本上升至 25.3 元, 但可通过余热发电(回转窑尾气 650°C)抵消 30%。

#### b) 局限性

低品位矿(Au < 1.2 g/t): 精矿量少导致尾渣焙烧规模不经济(<10 t/h), 需区域集中处理中心, 运输半径 ≤ 80 km 方可持平成本。

融资约束: 海外中资中小矿企贷款利率 > 8% 时, NPV 对“压滤 + 焙烧”方案敏感度最高, 可考虑改为“压滤 - 水泥窑协同”降投资 30%, 但脱氰效率降至 85%。

### 6.3.4. 外推案例评估

对比了三种外推场景玉有关案例的关键指标, 见表 3。评级以五星制, 综合技术、经济、政策风险。

Table 3. Comparison of key indicators between three extrapolation scenarios and existing cases

表 3. 三种外推场景与现有案例的关键指标对比

场景	地质/气候特征	主要适配改造	新增投资(相对 Case-A)	预期挑战	技术可迁移性评级*
新疆戈壁	年蒸发量 2200 mm, 地震烈度 VIII 度	防渗膜升级 + 防风抑尘网	+18%	水资源短缺, 需回用蒸发冷凝液	★★★★☆
云南山区	年均降雨 1600 mm, 坡度 25°	隧洞式干堆库 + 截排水隧洞	+42%	边坡稳定, 施工便道费用高	★★★★☆
印尼低投资矿	高湿, 电价 0.12 USD/kWh	取消回转窑, 改为“压滤-水泥窑协同”	-30%	政策风险, 尾渣跨省运输许可	★★★☆☆

### 6.3.5. 结论

在地质条件稳定、蒸发量高、电价中等(0.45~0.65 元/kWh)的内陆金矿, 该技术方案具备高普适性;

对高降雨、高地震烈度或低品位矿山, 需要针对性改造或采用替代流程, 投资增幅 15%~50%;

资金紧张或电价高企的海外项目, 建议退阶为“压滤 - 水泥窑协同”方案, 牺牲部分脱氰效率以换取可行性。

## 7. 结论与展望

1) 以毒性物质含量为核心的精准分类, 是破解氰化尾渣管理瓶颈的首要环节, 建议建立全国统一的

CN<sup>-</sup>、SCN<sup>-</sup>、重金属数据库；

2) 550℃氧化焙烧协同降解技术可实现 CN<sup>-</sup>、SCN<sup>-</sup>同步深度脱除，下一步需开发富氧侧吹、微波外场等低能耗工艺；

基于数字孪生的尾矿库健康诊断与风险预警平台将成为黄金行业安全管理的必然趋势，亟需制定相关技术规范与标准。

## 参考文献

- [1] 袁嘉声, 畅永锋, 郑春龙, 等. 氰化尾渣脱氰技术综述[J]. 中国有色金属学报, 2021, 31(6): 1568-1581.
- [2] 何朦雨, 赵冰, 袁帅, 等. 氰化尾渣中总氰化物及硫氰酸盐同步氧化降解无害化处置[J]. 有色金属(选矿部分), 2024(5): 99-109.
- [3] 王琪, 李金惠, 等. HJ943-2018 黄金行业氰渣污染控制技术规范[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2018.
- [4] 迟崇哲, 刘影, 龙振坤, 等. 黄金行业氰渣脱氰处理技术现状及资源化发展趋势[J]. 黄金, 2020, 41(9): 119-122.
- [5] 刘大学, 郭持皓, 王云, 等. 青海滩洞山焙烧氰化尾渣回收金银[J]. 有色金属(冶炼部分), 2011(8): 32-35.
- [6] 孙留根, 常耀超, 徐晓辉, 等. 氰化尾渣无害化、资源化利用的主要技术现状及发展趋势[J]. 中国资源综合利用, 2017, 35(10): 59-62.
- [7] 陈国民, 杨洪英, 陈彦臻, 等. 金矿预氧化处理过程中砷的转化[J]. 黄金科学技术, 2023, 31(5): 865-872.
- [8] 龙燕, 曹学新, 等. GB50988-2014 有色金属工业环境保护工程设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [9] Boboev, I.R. and Tabarov, F.S. (2021) Removal of Scorodite Arsenic from Gold Ore in the Form of AS<sub>2</sub>S<sub>3</sub> and AS<sub>4</sub>S<sub>4</sub>. *Hydrometallurgy*, **199**, Article ID: 105530. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105530>