

## 有色金属矿选矿的清洁生产评价体系构建

侯君一

新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，新疆 哈密 839000

[摘要]有色金属矿开展选矿工作，在为社会经济发展提供重要原材料过程当中，也带来了严重环境问题，据统计数据表明，我国有色金属选矿厂平均回水利用率仅为 65%，这一数据远低于国际先进水平 85%；我国有色金属选矿时吨矿新鲜水耗为 8~15m<sup>3</sup>，尽管如此国际先进水平是 5~8m<sup>3</sup>，除此之外，每年还会产生大量尾矿等废弃物，这些废弃物对土壤水体以及空气造成了不同程度污染，因而构建科学合理有色金属矿选矿清洁生产评价体系，对于推动该行业实现绿色可持续发展而言具有十分必要意义。

[关键词]有色金属矿；选矿；清洁生产；评价体系；层次分析法

DOI: 10.33142/aem.v7i10.18241 中图分类号: X38 文献标识码: A

## Construction of Clean Production Evaluation System for Nonferrous Metal Mineral Processing

HOU Junyi

Hami Geological Brigade of Xinjiang Uygur Autonomous Region Geological Bureau, Hami, Xinjiang, 839000, China

**Abstract:** The beneficiation of non-ferrous metal mines has brought serious environmental problems in the process of providing important raw materials for social and economic development. According to statistical data, the average utilization rate of return water in Chinese non-ferrous metal beneficiation plants is only 65%, which is far below the international advanced level of 85%; During the beneficiation of non-ferrous metals in China, the fresh water consumption per ton of ore is 8~15 cubic meters. Despite this, the international advanced level is 5~8 cubic meters. In addition, a large amount of tailings and other waste are generated every year, which cause varying degrees of pollution to soil, water, and air. Therefore, building a scientific and reasonable evaluation system for clean production of non-ferrous metal ore beneficiation is of great significance for promoting the green and sustainable development of the industry.

**Keywords:** nonferrous metal ores; mineral processing; clean production; evaluation system; analytic hierarchy process

### 引言

本文旨在构建有色金属矿选矿的清洁生产评价体系。通过分析行业现状，确定资源能源利用、污染物排放、生产工艺等评价指标，运用层次分析法等建立模型。数据显示，我国选矿厂平均回水利用率 65%，国际先进水平 85%，该体系可提升资源利用率，减少污染，为行业清洁生产提供科学依据，具有重要现实意义。

### 1 构建评价体系的现状分析

#### 1.1 行业清洁生产现状

目前，我国有色金属矿选矿行业在清洁生产方面取得了一定进展，部分大型企业选用了先进生产工艺以及环保设备，资源利用效率有所提高，污染物排放到了一定程度控制，但从整体状况来看，行业清洁生产水平参差不齐，中小型企业由于资金技术等方面存在限制，清洁生产实施力

度不够，除了前面所提到回水利用率和吨矿新鲜水耗数据之外，在能源消耗方面，我国有色金属选矿综合能耗平均为每吨矿 35~50kg 标准煤，而国际领先企业能够把能耗控制在 25~35kg 标准煤，在尾矿综合利用方面，我国平均利用率仅为 20% 左右，这一数据远低于一些发达国家 50% 以上水平<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 存在的问题

生产工艺落后乃是制约矿业实现清洁化转型关键瓶颈之一，当下，依旧存在大量企业沿用数十年前传统选矿工艺，这些工艺往往在破碎磨矿方面能耗颇高分选效率较低药剂用量较为粗放，进而致使有价值金属矿物未能以充分解离以及回收，资源综合利用率长期处于低位徘徊状态，更为严重是，落后工艺还伴随着巨大环境代价：浮选尾矿中含有大量残留化学药剂以及重金属离子，废水毒性较

高且难以进行回用；细粒尾矿和矿泥堆存不仅会占用土还存在扬尘与渗滤液污染风险，但是诸多企业鉴于资金限制或者技术惯性，在升级高性能破碎设备引入高效浮选柱采用智能控制系统等现代化改造方面投入不足，从而致使整个行业面临资源浪费与污染排放双重压力。

企业环保意识薄弱以及制度体系不健全同样严重阻碍了清洁生产推广，部分矿山企业仍旧固守“重产量轻环保”落后观念，盲目追求短期经济效益，而忽视环境管理以及长效可持续发展，与此同时，适用于不同矿种规模以及工艺路线清洁生产评价标准尚未完善，企业在开展节能减排资源化实践时缺乏系统可操作技术导则以及绩效评估依据，除此以外相关监管机制也存在覆盖不全执行力度不足等方面问题，对污染排放资源消耗约束偏软现象，难以对企业形成强有力外部驱动。

## 2 评价体系的指标确定

### 2.1 资源能源利用指标

在矿业与冶金工业朝着绿色转型进程中，开展一套包含水资源利用率能源消耗系数以及选矿回收率科学且能够进行量化关键绩效指标（KPI）体系建立工作，这是衡量并推动生产过程当中资源效率评估企业资源综合利用率以及可持续发展能力核心基础所在<sup>[2]</sup>。其中，水资源利用率指是循环用水量与总用水量（循环用水量加上新鲜水用量）比值，它所反映是企业节水技术运用以及水管理方面水平，国内企业可以通过构建分级水网络系统来提高这一指标，国际先进水平达到88%~92%，需要依靠高效节水工艺废水回用技术以及精细化水平衡管理来实现；能源消耗系数指是生产单位产品（每吨矿石或者金属）折算为标准煤之后能耗总量，它体现了工艺流程设备能效以及能源管理能力，企业借助引入余热回收系统智能变频设备等方式能够降低该指标，目标应当设定为每吨矿消耗30kg 标准煤以下，同时还需要淘汰高耗能设备并且运用智能化能源监控系统；选矿回收率是精矿中有用成分质量与原矿中该成分总质量百分比，是衡量资源提取效率根本指标，技术成熟矿产可以通过优化药剂制度引入智能控

制系统来提升，复杂共伴生矿产需要结合工艺优化与技术经济评价来确定合理目标，其提升关键在于碎磨工艺优化高效捕收剂开发以及先进自动控制技术应用，这三者协同发挥作用能够帮助企业提高资源效率降低成本并且增强可持续竞争力。不同矿种资源能源核心指标实际应用值对比见表1，可直观体现各矿种技术水平差异：

### 2.2 污染物排放指标

在矿业与冶金工业环境管理以及可持续发展实践开展过程当中，对于废水废气以及固体废物实施科学量化管控工作是至关重要这直接与企业环境合规性生态影响以及社会责任履行等方面产生关联，废水排放量通常所指是在选矿过程里，单位时间内不能够进行回用而需要向外排放水量，是以立方米每小时（m<sup>3</sup>/h）来进行计量，在国内某一年处理1000万t矿石大型铅锌矿于2023年完成了闭路水循环改造工作，通过增设处理能力为500m<sup>3</sup>/h高效澄清池以及超滤膜系统，把外排废水从75m<sup>3</sup>/h降低至32m<sup>3</sup>/h，远远低于50m<sup>3</sup>/h限值，一年减少排放大约28万t，同时水体扰动风险降低了60%，提高水循环利用率以及减少新水取用是控制该指标关键所在，不同规模选厂应当设定差异化限值：大型选厂（年处理量>1000万t）适宜低于50m<sup>3</sup>/h，中型选厂（300~1000万t）为30~50m<sup>3</sup>/h，小型选厂(<300万t)应当控制在20m<sup>3</sup>/h以下，以此来推动企业选用高效浓密过滤以及膜分离等节水技术。

废气当中污染物浓度是衡量大气污染控制效果核心指标，特别是在冶炼和焙烧过程中，二氧化硫和粉尘排放是最为关键<sup>[3]</sup>。某年产20万吨阴极铜冶炼厂运用双碱法脱硫工艺（NaOH+Ca(OH)<sub>2</sub>循环吸收）之后，二氧化硫排放浓度从520mg/m<sup>3</sup>降低至180mg/m<sup>3</sup>，低于300mg/m<sup>3</sup>通用标准，一年减排大约800t；其焙烧车间配备了12000m<sup>2</sup>布袋除尘系统，粉尘浓度从45mg/m<sup>3</sup>降低至7mg/m<sup>3</sup>，满足10mg/m<sup>3</sup>以下限值，周边PM2.5年均浓度下降了12μg/m<sup>3</sup>，这就要求企业必须配备高效脱硫（如双碱法活性炭吸附）以及除尘设施（如布袋除尘电除尘），从而实现清洁排放。

表1 国内典型矿种资源能源核心指标实际应用值（2024年数据）

矿种类型	水资源利用率 (%)	能源消耗系数 (kg标煤/吨矿)	选矿回收率 (%)	原矿品位	年处理规模 (万 t)	关键技术措施
大型铜矿	83~85	27~30	85~88	0.45~0.60	1200~1800	智能浮选控制、三级水网络回用
大型铁矿	78~82	25~28	88~92	28~35	1800~2500	余热回收、高压辊磨工艺
中型金矿	75~78	32~35	80~83	2.5~3.2 (g/t)	300~500	炭浸法优化、废水循环利用
复杂多金属矿	70~73	38~42	78~82	1.5~2.0	500~800	阶段磨矿-阶段选别、新型药剂

尾矿作为选矿产生主要固体废物，其排放量以及有害成分含量直接对长期环境风险产生影响，在某年产生 800 万 t 尾矿铁矿通过“尾矿再选回收铁精矿+剩余尾矿制膏体充填采空区”工艺，将资源化利用率从 30% 提高至 65%，外排量从 560 万 t/ 年降低至 280 万 t/ 年，尾矿库堆存压力减少了 50%，并且，尾矿有害成分需要符合《危险废物鉴别标准》(GB 5085.3—2007) 毒性浸出限值，铅镉、砷铬分别不超过 0.05mg/L、0.01mg/L、0.05mg/L、1.5mg/L，该铁矿尾矿浸出检测结果为铅 0.03mg/L、镉 0.008mg/L、砷低 0.02mg/L、铬 0.8mg/L，有效抑制了雨水淋溶所导致污染物迁移，避免了持久性环境污染。不同规模选厂污染物排放指标实际控制值对比见表 2，可体现差异化管控成效：

### 2.3 生产工艺指标

在对现代矿业与冶金企业生产工艺先进性予以评价时，需要去构建一个涵盖多个维度综合评估体系，其中自动化水平以及资源综合利用效率是核心考量维度<sup>[4]</sup>。在自动化水平这一方面通过运用集成 DCS、PLC 以及智能优化算法控制工艺，能够实现破碎磨矿浮选等关键工序精准闭环控制，国内某镍矿引入智能磨矿控制系统之后，磨矿产品粒度合格率到了极大程度提升，人工干预频次以及电耗药耗均有所下降，浮选环节凭借 DCS 系统对气量与液位进行调控，也提高了生产稳定性，在评价过程中，应当优先把采用智能传感器关键设备联网率 ≥90% 并且具备自优化能力生产线当作考量对象，这是因为其能够减少人工操作不稳定因素，提升生产效率以及流程稳定性，并且实现节能降耗；在资源综合利用效率这一方面尾矿综合利用率（也就是资源化利用尾矿量占总产生量百分比）是关键指标，国内某企业把金矿尾矿用于生产建材，某煤矿利用洗煤矸石充填采空区，均实现了环境效益与经济效益双赢，将该指标目标值设定为 50% 以上，能够推动企业突破传统尾矿库堆存模式，加大尾矿再选膏体充填等技术研发应用，减少固体废物排放以及环境足迹，同时把废弃物转化为新经济来源。

表 2 国内不同规模选厂污染物排放指标实际控制值（2024 年数据）

选厂规模	废水排放量 (m³/h)	废气二氧化硫浓度 (mg/m³)	废气粉尘浓度 (mg/m³)	尾矿铅浸出值 (mg/L)	尾矿镉浸出值 (mg/L)	尾矿资源化利用率 (%)
大型 (>1000 万 t/ 年)	32~45	150~220	6~9	0.02~0.04	0.006~0.009	60~70
中型 (300~1000 万 t/ 年)	25~35	220~280	8~12	0.03~0.05	0.008~0.012	45~55
小型 (<300 万 t/ 年)	12~20	280~350	10~15	0.04~0.06	0.010~0.015	30~40

## 3 评价体系的模型建立与应用

### 3.1 模型构建方式

有色金属矿选矿清洁生产水平评价属于一项系统性工程，运用层次分析法能够有效构建起科学合理评价模型，该模型要明确目标层，也就是有色金属矿选矿过程中清洁生产水平综合评价，它作为整个分析体系最终指向，在此基础之上，进一步去确定准则层，主要涵盖资源能源利用污染物排放以及生产工艺等关键维度，这些准则从不同方面反映出清洁生产核心要求，共同为目标层实现提供支撑。

在准则层之下设立方案层，方案层由一系列具体且可操作评价指标所组成，单位产品能耗水资源循环利用率以及废水废气排放浓度固体废物产生量工艺设备先进性等，这些指标直接与生产实际相关联，方便进行数据采集以及量化分析，通过邀请行业专家进行打分，依据他们专业经验对各层次指标间相对重要性做出判断，进而构建判断矩阵并计算出各指标在相应层次中权重分配，以此确保权重设置具备较高权威性以及客观性<sup>[5]</sup>。

在完成权重确定之后，需要对每个具体指标进行量化评分，通常可以依据国家标准行业规范或者企业历史数据来设定评分标准，把实际监测或者统计值转化为统一尺度分数，最后通过加权求和方式，将各指标分与其对应权重相乘之后累加，从而到最终综合评价总分，根据事先划分清洁生产等级标准，譬如一级（国际先进）、二级（国内先进）、三级（国内基本）等，就能够判断该选矿企业清洁生产实际水平，为管理决策以及改进方向提供清晰依据。

### 3.2 模型应用实例

以某有色金属矿选矿厂为例，我们基于已建立清洁生产水平评价体系对其展开实际评价，该厂部分关键指标数据如下：回水利用率为 70%，吨矿新鲜水耗达到 12 立方米，综合能耗为每吨矿 40kg 标准煤，选矿回收率处于 80% 水平，在环境排放方面，其废水排放量为每小时 60m³，废气中二氧化硫浓度为 350mg/m³，粉尘浓度为 15mg/m³，而尾矿综合利用率仅为 30%，这些实际运行数据被逐一纳入评价模型，通过指标量化与加权计算，出该企业综合分处于较低区间。

根据评价结果，该选矿厂被判定为清洁生产水平较低企业，尤其在资源循环利用以及污染物控制方面存在明显短板，这一结果反映出企业在生产过程资源效率环境管理以及技术先进性上还有较大提升空间，针对评价所揭示问题，我们提出了一系列改进建议：首要是采取技术和管理措施进一步提高回水利用率，降低新鲜水消耗；同时还应当重点对破碎分选等核心工序进行工艺优化以及设备更新，以降低能耗并提高回收率；不仅如此还需要加强废气治理设施建设与运行管理，特别是对二氧化硫和粉尘实施高效净化，并推进废水处理与回用系统改造升级<sup>[6]</sup>。

企业根据建议制定了详细整改方案并积极推进实施，经过一段时间技改和管理提升，各项指标呈现出显著改善：回水利用率大幅提高，吨矿水耗和综合能耗明显下降，选矿回收率到提升，废气污染物排放浓度有效降低，尾矿综合利用途径也到进一步拓展，最终通过复评看到企业综合分显著提高，清洁生产水平实现了阶段性跃升，展现出循环经济和绿色矿山良好发展态势。

#### 4 结语

构建的有色金属矿选矿清洁生产评价体系，可全面反映企业清洁生产水平。通过该体系能找出企业存在的问题，

为改进提供方向。未来，随着技术进步，需不断完善指标和模型，推动行业向更高水平清洁生产迈进，实现经济效益与环境效益统一。

#### 【参考文献】

- [1]周李蕾.选矿厂废水的清洁生产技术研究——以四川某铅锌矿选矿厂为例[J].四川有色金属,2020(4):50-55.
- [2]贾潇寅.双柳矿选煤厂清洁生产管理研究[D].北京:北京化工大学,2020.
- [3]景泽蓉.清洁生产技术在洗选厂的应用探讨[J].石化技术,2020,27(2):284.
- [4]胡振,伍红强,黄神龙,等.黄沙坪铅锌矿无石灰清洁生产选矿新工艺研究[J].现代矿业,2020,36(2):81-83.
- [5]孙旭春.清洁生产技术在洗选厂的应用与实践[J].清洗世界,2019,35(8):48-49.
- [6]周李蕾.清洁生产技术在会理锌矿选矿厂应用后产生的效益分析[J].四川有色金属,2017(4):56-59.

作者简介：侯君一（1976.5—），毕业院校：南方冶金学院（江西理工大学），所学专业：选矿，当前就职单位名称：新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队，就职单位职务：矿业公司副总经理（地质矿产开发院副院长），职称级别：副高。