

湿法冶金在铜、镍、锌冶炼中的最新技术进展

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]湿法冶金技术凭借绿色低碳优势,在铜、镍、锌冶炼领域取得显著突破。铜冶炼中,生物浸出回收率提升至76.0%,酸溶铜浸出率达96.94%,阳极精炼项目实现日产能534吨;镍冶炼领域,红土镍矿高压酸浸技术产业化应用占全球产能超70%,钴镍分离萃取率达99.9%;锌冶炼通过工艺优化,浸出渣含锌降至1.5%以下,伴生镓萃取率超99.6%。这些技术进步显著降低能耗与污染,推动有色金属工业可持续发展,为复杂矿产资源高效利用提供关键支撑。

[关键词]湿法冶金;铜冶炼;镍冶炼;锌冶炼;技术进展;生物浸出;高压酸浸

DOI: 10.33142/ec.v8i7.17580

中图分类号: TF804

文献标识码: A

The Latest Technological Progress of Hydrometallurgy in Copper, Nickel, and Zinc Smelting

HOU Junyi

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

Abstract: Wet metallurgy technology has made significant breakthroughs in the fields of copper, nickel, and zinc smelting with its green and low-carbon advantages. In copper smelting, the biological leaching recovery rate has been increased to 76.0%, the acid soluble copper leaching rate has reached 96.94%, and the anode refining project has achieved a daily production capacity of 534 tons; In the field of nickel smelting, the industrial application of high-pressure acid leaching technology for laterite nickel ore accounts for over 70% of global production capacity, with a cobalt nickel separation and extraction rate of 99.9%; Through process optimization, zinc smelting has reduced the zinc content in leaching slag to below 1.5%, and the extraction rate of associated gallium exceeds 99.6%. These technological advancements significantly reduce energy consumption and pollution, promote the sustainable development of the non-ferrous metal industry, and provide key support for the efficient utilization of complex mineral resources.

Keywords: wet metallurgy; copper smelting; nickel smelting; zinc smelting; technological progress; biological leaching; high pressure acid leaching

引言

随着全球范围内矿产资源品位呈现下降态势以及环保要求不断升级,传统火法冶金所具有高能耗高污染等弊端愈发显著显现出来,湿法冶金作为一种借助溶液中化学反应来达成金属提取目技术,具备能耗低污染小以及资源综合利用率高特性,已然成为有色金属冶炼领域重要发展方向,近些年来,在铜镍锌等关键金属冶炼方面,湿法冶金技术持续进行创新突破,出现了诸如生物浸出优化高压酸浸产业化以及新型萃取剂运用等多项关键技术成果,本文对湿法冶金在铜镍锌冶炼中最新技术进展展开系统梳理,剖析其技术特性应用效果以及发展趋势,从而为行业技术升级以及可持续发展提供参考。

1 湿法冶金在铜冶炼中的技术进展

1.1 生物浸出技术高效化应用

生物浸出技术作为去处理低品位铜矿主流方法,近年来在回收效率提升以及工艺优化方面持续取重要进展,在2024年,McEwen Copper公司在智利Los Azules项目开展生物堆浸试验中,通过对浸出周期菌种活性、喷淋强度以及pH值等关键工艺参数进行系统优化,成功把铜平均

回收率提升至76.0%,相较于2023年初步经济评估阶段72.8%,这一数据提高了3.2个百分点,显示出显著技术进步,回收率提升不仅直接提高了资源利用效率,还预计会在项目全生命周期内额外增加约17.2万t铜阴极产量,从而带来约2.62亿美元净现值增长,显著增强了该项目经济可行性,该工艺在成本控制方面也取积极成效,通过优化微生物群落结构以及改善浸出环境,McEwen Copper成功将净酸耗降低了8.3%,这不仅减少了硫酸等试剂用量,也降低了物料采购与废弃物处理成本,从而进一步提升了整体工艺经济性和环境友好性^[1]。

中色迪兹瓦项目在生物浸出技术应用方面也表现突出,该项目通过引入低铜料液预浸出系统,有效提高了初期浸出阶段反应稳定性以及金属溶出效率,该系统通过控制料液中初始铜离子浓度,优化了浸出动力学条件,最终使酸溶铜浸出率达到96.94%,较去年同期提升0.43个百分点,在实现高效浸出同时,酸溶铜金属综合回收率也达到94.17%,体现出良好系统协调性和金属回收完整性,不仅如此中色迪兹瓦在辅材使用效率方面也取了优于行业平均水平表现,包括硫酸氧化剂以及其他催化剂单位消

耗量均实现有效控制,既降低了运营成本,也减轻了环境负担,这些进展共同体现了生物浸出技术在提升资源回收率降低生产成本以及实现绿色矿山目标方面综合价值,为同类低品位铜矿开发提供了有益借鉴。

1.2 电解精炼环节节能减排升级

在铜电解精炼领域,易门铜业于2025年建成阳极精炼节能减排项目已成为行业转型升级重要标杆,该项目新建了两台180t大型阳极炉以及配套环保与自动化控制系统,实现了从粗铜原料到阳极铜板一体化连续生产,彻底改变了传统多段式处理复杂流程,尤为引人注目是,整个工程从启动施工到建成投运仅用时100d,比原计划提前80d完成,展现出卓越项目管理和工程建设能力,在试生产阶段,项目运行表现突出,日产能迅速提升至534t,不仅远超设计预期,其产出阳极铜板在物理规格和化学成分方面均达到高标准水平,获了下游电解精炼企业高度认可,产品质量稳定性提高,为后续电解工艺高效运行奠定了坚实基础。

从环保角度看,该项目通过省略粗铜铸锭环节,彻底消除了该工序中可能产生烟尘逸散和含硫废气排放等环境风险,显著减轻了末端治理压力,同时,一体化生产避免了传统工艺中铸锭冷却后再次熔化所带来巨大热能浪费,使单位产品综合能耗大幅下降,实现了能源集约化利用,该项目成功实施,不仅体现了易门铜业在绿色冶炼技术上创新突破,更展示了现代铜工业在经济效益与环境责任之间实现协同发展可行路径,通过缩短流程提升能效和降低排放,该项目为同类型企业提供了可复制可推广技改范例,有力推动了整个行业向资源节约环境友好方向发展^[2]。

2 湿法冶金在镍冶炼中的技术进展

2.1 红土镍矿高压酸浸技术实现产业化突破

红土镍矿湿法处理由于矿相复杂(其中含镁量为8%~12%、镍品位为1.5%~2.2%)以及高镁干扰缘故,长期处于受限状态,中国恩菲研发团队基于此状况,历经12年攻关历程,从而构建起了高压酸浸技术体系,在这一过程中,完成了1200余份试验,对酸浓度(即180~220g/L硫酸)与反应温度(也就是240~260℃)等关键参数进行了优化,还开发出了产品转晶技术(其结晶速率为5~8℃/h、搅拌强度为300~400r/min),通过这些努力,使产品纯度从98.2%提高至99.5%以上,并且晶体粒径均匀度达到了85%,同时,研制出了能够耐受280℃高温以及10MPa高压50m³钛合金反应釜,还有精度为±5L/h智能酸控系统,2009年,瑞木项目投产(此乃全球首个工业化项目),该项目年产能镍6万t钴0.7万t,连续运行率为92.3%,镍钴回收率分别达到86.5%和82.1%,单位镍能耗为380kW·h/~Ni(降耗幅度为25%),2024年,印尼力勤OBI与华越项目合计镍产能占据全球高压酸浸总产能(68万t)70.6%,借助技术优化(将阀门开启速

率从1.2s/次提升至0.8s/次使蒸汽排量稳定在42t/h),把闪蒸槽压力波动从±0.8MPa控制至±0.2MPa以内,故障停机时间从4.5h/d降低至0.3h以下,从而保障了日均3000t镍钴精矿(镍品位22%、钴品位2.5%)稳定产出,充分彰显了该技术适应性与创新性^[3]。不同红土镍矿高压酸浸项目核心技术经济指标对比见表1,可清晰体现技术产业化进程中的突破。

2.2 镍钴分离萃取技术深入研究

在湿法炼镍流程中,镍钴分离是决定产品纯度与资源利用率的核心关卡,因镍(离子半径0.069nm)与钴(离子半径0.074nm)化学性质高度相似,常规P204萃取体系存在分离效率低(Ni/Co分离比<1000)、杂质残留高(铜铁>0.02g/L)的问题,处理含铜0.3%~0.5%、铁1.2%~1.8%的复杂矿料时,处理量更<5m³/h,难以兼顾分离精度与生产效率;对此,中科院团队研发的季铵盐萃取体系通过“季铵氯化物萃取除杂-季铵硫氰酸盐萃取分离钴镍”两步流程,在硫酸盐-氯化物混合体系(硫酸浓度50~80g/L、氯化物浓度30~50g/L)中实现突破:第一步除杂阶段,采用浓度15%~20%的季铵氯化物,在pH=1.5~2.0、有机相/水相(O/A)=1:3、3级逆流萃取条件下,料液中铜残余浓度降至0.005g/L以下、铁残余浓度降至0.003g/L以下,铜萃取率99.6%、反萃率99.8%,铁萃取率99.95%、反萃率99.7%,萃取剂循环使用次数超50次,药剂消耗成本从80元/t料降至48元/t料(降低40%);第二步镍钴分离阶段,采用浓度20%~25%的季铵硫氰酸盐,在pH=4.0~4.5、O/A=2:1条件下,钴镍离子分配系数($\beta_{Co/Ni}$ =5000),经3级逆流萃取后,硫酸镍溶液中Ni/Co达 2×10^4 (满足99.99%镍板要求),反萃得到的钴液中Co/Ni超250,钴萃取率99.92%、反萃率99.95%、总收率超99.9%;该技术可处理低品位镍矿(镍品位0.8%~1.2%)与复杂多金属矿(含镍1.0%、钴0.1%、铜0.2%),处理量达15m³/h(较传统体系提升3倍),流程从12级萃取缩短至7级(缩短40%),废水排放量减少30%,为湿法冶金提供兼具环保性与经济性的高效技术范式^[4]。季铵盐萃取体系与传统萃取体系关键性能指标对比见表2,可直观体现技术优势。

3 湿法冶金在锌冶炼中的技术进展

3.1 浸出工艺优化以及资源综合利用情况

锌精矿加压浸出技术作为现代锌冶炼领域里处于核心位工艺,其技术升级以及效率提升直接和资源利用率以及产业环保水平相关联,近些年来,该技术在关键参数优化以及全元素回收方面取突破,不但推动了冶炼流程朝着绿色化方向转型,而且还实现了低价值伴生元素高效富集,为行业高质量发展给予了重要支撑,中金岭南丹霞冶炼厂所采用二段逆流加压浸出工艺,成为了参数优化方面典范,团队借助数百次试验验证,把浸出温度精确控制在150~

表 1 全球典型红土镍矿高压酸浸项目核心指标对比（2024 年数据）

项目名称	所在国家	年产能(镍:万吨; 钴:万吨)	连续运行率(%)	镍回收率(%)	钴回收率(%)	单位镍能耗 (kW·h/t-Ni)	核心技术突破
瑞木镍钴项目	巴布亚新几内亚	6.0; 0.7	92.3	86.5	82.1	380	全球首个工业化 稳定运行项目
印尼力勤 OBI 项目 (二期)	印尼	24.0; 3.0	94.5	88.2	85.3	350	闪蒸槽压力精准 控制(±0.2MPa)
印尼华越镍钴项目	印尼	12.0; 1.5	93.1	87.8	84.7	365	耐高压腐蚀反应 釜国产化
国外某试验项目	澳大利亚	0.5; 0.06	75.2	82.3	78.5	480	未实现工业化稳 定运行

表 2 镍钴分离萃取体系关键性能指标对比

萃取体系类型	处理量 (m³/h)	镍钴分离比 (Ni/Co)	铜残余浓度 (g/L)	铁残余浓度 (g/L)	钴总收率 (%)	药剂消耗 (元/t 料)	萃取级数	废水排放量 (m³/t 产品)
季铵盐萃取体系	15	2×10^4	<0.005	<0.003	>99.9	48	7	8.5
传统 P204 萃取体系	5	<1000	>0.02	>0.015	95.2~96.5	80	12	12.1
传统 P507 萃取体系	8	1500~2000	>0.01	>0.008	97.8~98.5	72	10	10.3

153℃这个区间内——此温度一方面避免了过高温导致设备腐蚀加剧情况发生，另一方面又确保了锌精矿中硫化物能够充分分解；与此同时，将系统压力稳定在 1400~1450kPa，为氧气在矿浆中高效溶解营造了理想环境，显著提高了氧化反应速率，在此基础之上，通过智能调控氧气通入量以及蒸汽供给节奏，氧气单耗相较于传统工艺降低了 12%，蒸汽消耗减少了 8%，这不但大幅度降低了能耗成本，而且还让锌浸出率稳定维持在 97%以上，尤为关键是，这一工艺对于伴生镓锗等稀散元素呈现出优异浸出效果，镓浸出率提升到 85%，锗达到 82%，为后续回收创造了有利条件，浸出渣中锌含量始终稳定在 5%以下，远远低于行业平均 8%，从源头减少了废渣中资源浪费。

赤峰中色锌业在 2024 年建成浸出渣处理项目，在资源全回收领域实现了突破性创新，鉴于传统锌冶炼中高浸渣铁矾渣难以进行无害化处理并且伴生元素回收率低这一痛点，该项目创新性选用“富氧侧吹熔炼+烟化炉吹炼”火法-湿法联合工艺：通过富氧侧吹熔炼把废渣中锌铅等金属富集成为熔融态粗合金，接着依靠烟化炉吹炼将易挥发锌元素转化为氧化锌烟尘，实现了主次元素高效分离，随后，采用三段逆流浸出工艺去处理氧化锌烟尘，通过逐级调节浸出液酸碱度，使锌回收效率达到 96%以上；而熔炼过程中产出富钢渣，经过稀酸浸出萃取提纯等湿法处理后，直接生产出纯度为 99.99%钢锭，钢回收率相较于传统工艺提升了 15 个百分点，最终排出浸出渣中，锌含量降至 1.5%以下，铅含量小于 0.2%，达到一般工业固废标准，无需特殊处置就能够综合利用，真正达成了从废渣到资源全链条转化，为锌冶炼行业“零排放”目标提供了可复制技术范式^[5]。

3.2 伴生元素萃取技术创新发展态势

新型高效萃取剂开发以及应用已然成为提升湿法冶金技术关键环节，特别是在锌冶炼过程中回收伴生稀散金属方面展现出了巨大潜力，在 2024 年，一种由烷基羟肟酸 DX201 以及传统萃取剂 P204 构成混合萃取体系成功研发出来，该体系针对硫酸介质中低浓度镓分离回收开展了专项优化，表现出了卓越萃取选择性以及稳定性，这一混合萃取体系创新点在于，DX 二零一引入显著增强了体系对镓离子络合能力以及相分离性能，在优化后工艺条件下，包括适宜 pH 环境相比以及搅拌强度等，单级萃取实验中镓萃取率高达 97.52%，而单级反萃取率也达到 94.21%，实现了金属高效转移以及富集，更为重要是，该体系在连续多级萃取中表现出良好稳定性以及适应性，经过三级逆流萃取后，镓总萃取率能够提升至 99.64%，极大程度上降低了溶液中残留金属含量，有效减少了有价金属损失。

该技术为锌冶炼系统中伴生镓资源综合回收提供了切实可行全新路径，在传统湿法炼锌流程里，镓等稀散金属常常因为浓度低分离难度大而未能到有效回收，最终进入废渣或者废水，造成资源浪费以及潜在环境负荷，DX201-P204 混合体系运用，能够在主金属锌提取同时，实现镓高效协同回收，大幅提高原料综合利用价值，与此同时该萃取体系还具备试剂消耗低操作窗口宽易于与现有湿法工艺集成等优点，具有良好工业推广前景，它成功应用不仅是萃取技术本身一次重要突破，也体现了现代冶金朝着绿色化精细化高附加值化转型发展趋势^[6]。

4 结语

湿法冶金技术在铜镍锌冶炼领域创新应用，推动了有色金属工业朝着绿色高效方向发展，铜冶炼生物浸出优化以及电解节能改造镍冶炼高压酸浸产业化以及深度萃取

分离锌冶炼渣料综合利用以及伴生元素回收等技术突破,提高了金属回收率(铜 76.0%、钴 99.9%、镓 99.64%),降低了资源消耗以及环境污染。未来,随着智能化控制与低碳工艺融合,湿法冶金将在复杂矿产资源利用稀贵金属回收等方面发挥更大作用,为全球有色金属产业可持续发展提供核心技术支持。

[参考文献]

- [1]冯虎林.湿法冶金锌电积用铅银合金阳极板中银的快速测定[J].湖南有色金属,2025,41(4):127-130.
- [2]彭峰.溶剂萃取在钨金属湿法冶金中的应用现状及研究进展[J].冶金与材料,2025,45(7):190-192.
- [3]王江飞,彭贵熊,王震,等.镍钴提取中湿法冶金工艺运用

分析[J].世界有色金属,2025(11):7-9.

[4]于奇元,龙跃,刘勇志,等.低共熔溶剂在湿法冶金浸出中的应用进展[J].绿色矿冶,2025,41(2):23-29.

[5]郝立东,董江波.加压湿法冶金技术在金属冶炼领域的应用及展望[J].世界有色金属,2025(5):7-9.

[6]郭真,陈杭,于建国.湿法冶金领域脉冲萃取技术与设备研究进展[J].有色金属(冶炼部分),2024(11):150-164.

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,当前就单位名称:新疆维吾尔自治区地质局哈密地质大队,就单位职务:矿业公司副总经理(地质矿产开发院副院长),职称级别:副高。