

关于锡提纯技术改进方法与经济效益分析

韦明磊（来宾华锡冶炼有限公司，广西 来宾 546100）

摘要：随着全球经济的发展和技术进步，市场对高品质锡产品的需求日益增长，这对锡提纯技术提出了更高的要求。传统的锡提纯方法虽然在一定时期内满足了生产需求，但面对日益激烈的市场竞争和严格的环保标准，现有技术逐渐暴露出杂质去除不彻底、能耗高、环境污染等诸多问题。探索更加高效、经济且环保的锡提纯技术已成为提升产业竞争力和实现可持续发展的关键。

关键词：锡；提纯技术；改进；经济效益

1 引言

锡作为一种重要的有色金属，在电子、光伏、新能源、生物医药等众多领域具有广泛的应用。但是随着锡矿资源的不断开采和利用，锡矿石的品位逐渐降低，提取难度逐渐增大，从而对锡提纯技术提出了更高要求。但与此同时，相关技术在实际应用中仍存在一些问题和挑战。例如，锡矿石的复杂性和多样性使得提纯过程难以控制，设备选型和维护成本较高，以及废水处理和固体废弃物再利用等问题也亟待解决。因此，进一步研究和改进锡提纯技术，探索更加高效、环保、经济的提纯方法，仍是当前锡提纯领域的重要课题。

2 锡的冶炼工艺及提纯技术

2.1 锡的来源

作为世界上的稀有金属之一，锡在地壳中的含量为0.004%，全球锡储量约490万t，基础储量约为1100万t。在自然界中锡主要以自然元素、金属互化物、氧化物、氢氧化物、硫化物、硫盐、硅酸盐、硼酸盐等形式存在。全球锡资源主要分布在中国、印度尼西亚、缅甸、澳大利亚、巴西、玻利维亚、俄罗斯、马来西亚、泰国等国。

2.2 锡的冶炼工艺

锡的冶炼工艺包括矿石开采、选矿、冶炼和精炼等环节。锡矿石的开采主要采用露天和地下开采两种方式。露天开采适用于表层覆盖较薄的矿体，地下开采则适用于深部矿体。而选矿则是利用锡矿石与其他矿物的物理或化学性质差异，通过破碎、磨碎、浮选、重选等手段将锡与其他杂质分离的过程。

锡的冶炼主要包括火法冶炼和湿法冶炼两种方法。火法冶炼主要利用火焰直接加热熔炼锡矿石和还原剂，产出粗锡。常见的火法冶炼方法包括反射炉熔炼法、电炉熔炼法、Ausmelt顶吹工艺等。湿法冶炼

主要利用化学反应将锡从矿石中溶解出来，再通过电解或其他方法提取纯锡。湿法冶炼具有环境友好、能耗低等优点，但操作复杂，且对原料适应性较差。

2.3 锡的提纯技术

目前，锡提纯技术方法主要包括物理法、化学法和生物法。

物理法提纯主要利用锡与其他杂质在物理性质上的差异进行分离，主要包括区域熔炼法、真空蒸馏法和电解法。区域熔炼法利用不同物质在熔融状态下的物理性质差异进行分离。该方法设备庞大、操作复杂。真空蒸馏法利用不同物质在真空状态下的蒸气压和蒸发速度差异进行分离。该方法同样存在设备庞大、操作复杂的不足。电解法通过在电解液中加入粗锡，利用电解作用将粗锡中的杂质分离出来。电解法的不足是能耗高、电解液消耗大。

化学法提纯主要利用化学反应将锡从杂质中分离出来，主要包括化学沉淀法、溶剂萃取法和离子交换法。化学沉淀法通过加入沉淀剂，使杂质元素生成沉淀，与锡分离。该方法中沉淀剂的选择和处理较为繁琐。溶剂萃取法利用溶剂对锡和杂质的溶解度差异进行分离。该方法的溶剂选择和回收较为困难。离子交换法利用离子交换树脂对锡和杂质的吸附能力差异进行分离。该方法适用于处理低浓度的锡溶液，但树脂的选择和再生较为复杂。

生物法提纯主要利用微生物的代谢过程将锡与其杂质进行生物化学转化，达到分离目的。该方法具有环境友好、能耗低等优点，但微生物的筛选和培养较为困难。

3 锡提纯技术的改进方法策略

3.1 优化改进方向

一是提高提纯效率。通过改进提纯工艺和设备，如优化破碎、磨矿、浮选、萃取等环节的参数设置，

提高设备的自动化和智能化水平，可以实现提纯效率的大幅提升。同时，采用联合提纯工艺，如重选-浮选联合、萃取-电解联合等，也可以进一步提高提纯效率。

二是降低能耗。通过优化提纯过程中的加热、冷却、搅拌等环节的能耗管理，采用节能设备和节能技术，如余热回收、高效电机等，可以显著降低能耗。此外，还可以通过改进提纯工艺，如采用低温浸出、高效萃取等技术，进一步降低能耗。

三是减少环境污染。通过加强废水、废气、废渣等污染物的治理和回收利用，采用环保型药剂和萃取剂，以及优化提纯过程中的化学反应条件，可以减少有害物质的排放，降低对环境的污染。

四是提高产品质量。通过优化提纯工艺和设备，严格控制提纯过程中的各种参数，如温度、压力、时间等，以及采用先进的检测和分析手段，可以确保提纯出的锡产品质量稳定、纯度高。

3.2 优化改进策略

3.2.1 工艺流程优化

在锡矿石的提取过程中，包括破碎、磨矿、选矿和脱水等关键流程，对这些流程进行优化可以降低锡提纯的能耗、减少环境污染以及提高生产效率。

一是破碎与磨矿优化。传统的破碎和磨矿工艺往往存在能耗高、效率低的问题。为了提高生产效率并降低能源消耗，可以在破碎前对原矿进行初步筛选，去除无用的大块脉石，减少进入破碎机的矿石量。同时，采用多段破碎工艺，逐步减小矿石粒度，确保最终产品达到理想的细度要求。该过程还可以引入闭路循环系统，使未达标的矿石重新返回磨矿设备继续加工，直至满足标准。这不仅提高了产品的均匀性，还减少了不必要的过粉碎现象。

二是选矿工艺优化。常见的选矿方法包括浮选法、重力选矿法、磁选法等。针对这些方法，可以引入先进的PLC、DCS等自动化控制系统，实现对选矿过程的精确控制。通过实时监测浓度、温度、pH值等参数，及时调整操作条件，保证最佳分选效果。同时可以结合多种选矿方法的优势，形成复合选矿工艺。例如，在浮选之前先进行重力选矿，利用跳汰机或摇床初步富集锡矿物；然后再通过浮选进一步提高精矿品位。在选别设备上，可以选用高效节能的新一代选别设备，如高效浮选机、离心选矿机等，以提升选矿效率和产品质量，据了解，新一代高效浮选机单锡矿回收率就比原来选矿机提高5%，甚至可以分离锡、锌、铅锑等多金属矿源。

三是脱水工艺优化。传统的脱水方式通常采用浓缩池加压滤机的方法，但存在占地面积大、处理时间长等问题。对此，可以应用高效浓密机代替传统浓缩池，其沉降速度快、底流浓度高，能够显著缩短脱水周期。也可以引入真空过滤器作为辅助脱水设备，它具有过滤面积大、滤饼含水量低的优点，特别适用于处理细粒级物料，对比原来的方式含水分可以从22%降低到12%。对于某些特殊需求的锡精矿，还可以采用喷雾干燥、流化床干燥等先进技术进行深度脱水，确保最终产品的水分含量符合标准。

3.2.2 药剂及工艺的创新

一方面，要加强新型浮选药剂的研发及应用。首先，可以基于分子模拟技术和计算机辅助设计，可以通过构建特定结构的分子模型，预测其在浮选过程中的行为特性，从而有针对性地合成高效的浮选药剂。例如，通过改变捕收剂分子链长度或官能团类型，可以增强其对锡矿物表面的选择性吸附能力。其次，可以利用自然界中存在的某些物质（如植物提取物、微生物代谢产物等）作为基础原料，经过化学改性后制成新型浮选药剂。此外，还可以将不同类型的药剂按照一定比例混合使用，形成多功能复配药剂。这种组合方式不仅可以提高浮选效率，还能减少药剂用量，降低成本。例如，将捕收剂与起泡剂、抑制剂等合理搭配，可以在同一浮选过程中完成多个任务，简化操作流程。

另一方面，也要重视浮选工艺的创新及优化。首先，可以根据锡矿物的不同赋存状态，设计多阶段浮选工艺。例如，首先进行粗选，尽可能多地回收易浮选的锡矿物；然后通过精选进一步提高精矿品位；最后再进行扫选，回收残留的少量锡矿物，最大限度地利用资源和避免浪费。其次，在浮选过程中加入逆流洗涤步骤，即用新鲜水从尾矿端开始逐级向上清洗泡沫层。这样做不仅可以带走夹带的杂质，还能增加锡矿物的暴露机会，提高浮选效率。此外，还可以建立基于在线监测数据的动态调控策略，根据实际生产情况实时调整浮选工艺参数。例如，当发现某一阶段的浮选效果不佳时，可以适当增加药剂量或延长浮选时间；反之，则可以减少药剂量以节约成本。

3.2.3 综合集成创新

单一的锡提纯技术越来越难以满足日益严格的环保要求和市场对高品质锡产品的需求。在此背景下，探索多种提纯技术的有机结合，形成一套完整的提纯

工艺体系，成为当前研究的重点方向。

一是浮选与磁选/电选互补。对于某些含有铁、铜等伴生金属的复杂锡矿石，单独使用浮选法可能无法达到理想的分离效果。而引入磁选或电选技术，与浮选法形成互补关系，可以共同完成锡矿物与其他脉石矿物的有效分离。具体来说，在浮选前先进行磁选或电选预富集，去除易分离的磁性或导电性强的矿物；然后再通过浮选进一步提纯锡矿物。这样不仅可以提高锡矿物的回收率，还能减少药剂用量，降低生产成本。

二是物理化学法与生物冶金协同。物理化学法可以直接去除废水中的重金属离子和悬浮物，确保水质达标排放；而生物冶金则利用微生物代谢活动促进矿石中有用成分的浸出，具有环境友好、成本低廉的特点。例如，在锡矿石浸出过程中添加特定菌种，可以加速锡元素的溶解速度，同时抑制有害细菌的生长繁殖，从而提高浸出效率。之后，再通过物理化学法对浸出液进行深度净化处理，去除其中残留的杂质，最终得到纯净的锡溶液。

三是火法与湿法冶金相结合。传统的火法冶金虽然能够初步去除锡矿石中的大部分杂质，但其能耗高、污染重的问题不容忽视；而湿法冶金虽可以进一步提高锡的纯度，但在处理复杂成分矿石时效率较低。因此，将两者有机结合，形成“火法-湿法”联合工艺，既能发挥各自优势，又能弥补彼此不足。例如，在粗锡制备阶段采用火法冶金进行高温还原和初步净化；随后，利用湿法冶金中的电解精炼或溶剂萃取技术，去除残留的微量杂质，最终获得高纯度锡产品。

4 改进锡提纯技术的经济效益分析

4.1 成本效益提升

4.1.1 原材料成本

通过优化选矿工艺和引入高效节能设备，可以有效提高锡精矿的品位，减少后续冶炼过程中的原材料消耗。据估算，采用多段破碎、闭路循环系统等措施后，原矿利用率可提高约10%-20%，直接降低了每吨锡产品的原材料采购成本。当前锡精矿价格约为每吨230000元人民币，那么每吨成品锡的成本节约可达23000-46000元，将带来显著的经济效益。

4.1.2 能源消耗成本

改进提纯工艺能够大幅减少能源消耗。以熔炼为例，新型节能球磨机和增加富氧冶炼相比传统设备节省了约30%的电力消耗；而“火法-湿法”联合工艺则可以在保证高纯度的前提下，降低整体能耗水平。据估算，每年可节省电费数100万元甚至1000万元

以上。此外，推广应用太阳能、风能等清洁能源，也可以进一步减少能源成本。对于每年用电量约5000万千瓦时的中型企业来说，使用清洁能源后每度电成本下降0.1元，每年可以节省电费500万元。

4.2 产品附加值提升

4.2.1 高品质锡产品

改进提纯技术能够显著提高锡产品的纯度，使其更符合高端制造业的需求。高品质锡产品在市场上具有更高的定价权，通常比普通锡产品高出5%-10%的价格，从而带来更大的利润空间。当前市场平均锡价约为每吨250000元人民币，那么每吨高品质锡的额外收入可达12500-25000元，从而能够为企业带来可观的利润增长。

4.2.2 开拓新市场

随着环保意识的增强和技术进步，越来越多的行业开始重视资源循环利用和绿色生产。通过改进提纯技术，不仅可以满足这些新兴市场需求，还能为企业带来新的增长点。例如，开发用于电子、化工等领域的超纯锡产品，以及回收再利用废旧电子产品中的锡材料，都能够创造额外的经济收益。

4.2.3 加强综合回收，提高竞争力

随着锡资源开采力度的不断加大，锡资源短缺的矛盾日益突出，锡资源品位不断下降，不管锡开采、选矿、冶炼等流程，都在不断努力提高富集和提纯技术水平，但资源毕竟有限，因此为了提高经济效益，结合自身矿源的特点，在改进主工艺的同时，综合回收技术也需要不断提升，特别是针对“稀有、稀少、稀贵”等金属综合回收。

参考文献：

- [1] 覃用宁, 甘激文, 韦真周, 等. 高锡粗锡二次电解制备高纯锡 [J]. 有色金属(冶炼部分), 2016, (02): 61-63.
- [2] 陈宝成. 提高锡冶炼综合回收率措施探讨 [J]. 有色矿冶, 2019, 35(06): 35-37+5.
- [3] 陈伟文. 一种高锡粗锡分离提纯的方法 [J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43(03): 61.
- [4] 任伟, 雷聪. 高纯锡中频挥发工艺中的保温罩材质对提纯效果的影响 [J]. 东方电气评论, 2024, 38(04): 11-15.

作者简介：

韦明磊(1983-)，男，籍贯：广西环江、学历：本科、单位：来宾华锡冶炼有限公司、职称：中级，主要研究方向：有色冶金工艺(锡、锌、铟冶炼工艺)及相关副产品回收和再利用；冶金三废治理或回收利用；冶金过程安全、环保管理技术。