



矿产资源

国际地学动态

2020年第2期

2020年2月

● 矿业创新技术进展之矿物加工和水处理

矿业科技专题

➤ 渐进式创新 (incremental innovation)

矿物加工的重大技术突破发生在多年前。最近的主要发展趋势包括：持续的机械化，选矿厂规模的扩大，以及信息技术（IT）在过程控制中的广泛应用。现今的创新模式在很大程度上是渐进式的，而新技术与渐进式创新之间的差别有时会变得模糊。然而，数字化为矿物加工的新变化提供了可能，工厂可以通过人工智能（AI）进行运营，从而实现动态控制和持续优化。目前，优化现有设备和流程是进一步提高矿业行业产能的关键。

借助数字技术，工厂将能够充分开发利用现有的大部分矿产资源。然而，截至目前，通过数字技术实现阶跃式变化的实例仍然非常有限。目前在矿物加工中人工智能的主要用途是检测异常。矿物加工的下一项主要技术任务是，建立选矿厂的数字孪生模型，以作为完全动态模型，以及应用人工智能来完全自动地控制作业流程，但这项工作仍处于初始阶段。

➤ 减少用水

本文之所以将水处理包括在矿物加工中，是因为任何矿山用水量最大的都是选矿厂，而最大程度减少水资源损失（减少清洁水用量）的最大机会就是尾矿管理设施（tailings management facility）。

目前，矿业企业正在研发各种方法以减少处理流程中的用水量，设计新的方法以便尽可能长时间地保持分选物料（process material）的干燥，以及评估各种尾矿储存方法来减少水量消耗并保留进入循环流程的水。这些进步不仅是由于法规和环保方面的推动，也是出于用水紧张和降低成本的考虑。

中国地质调查局地学文献中心 主办
(中国地质图书馆)

矿业创新技术进展之矿物加工和水处理

1 矿物加工新技术

矿物加工技术的重大突破有两次，一次是 100 多年前的浮选技术，另一次是 50 多年前的溶剂萃取技术。最近的主要发展趋势包括：持续机械化，选矿厂规模的扩大，以及信息技术在过程控制中的应用。现今的创新模式在很大程度上是渐进式的，大多数知名设备制造商都制定了研发计划，并与业界和学术机构建立了长期的技术合作关系。这使得他们能够发布新的或升级的设备，新设备通常侧重于提高效率和回收率并最大程度地减少工厂占地面积。其中，能源效率和水的最优利用是两个重点领域。

在矿物加工方面也发表了大量技术论文，同样主要集中在对现有技术的逐步改进上。除了数字化之外，目前技术创新的数量似乎相对有限。然而，数字化为矿物加工出现新变化提供了可能，工厂可以通过人工智能进行运营，从而实现动态控制和持续优化。目前，优化现有设备和工艺流程是进一步提高产能的关键。借助数字化技术，工厂可以实现既有大部分设备的最优化使用。

美卓（Metso）公司的首席数字官（CDO）Jani Puroranta 提出了选矿厂数字化的两个关键领域：先进过程控制（APC）和预见性维护。先进过程控制是一种整体方案，既可以识别出工厂的限制条件，也可以利用软件在每次设定点自动做出正确决定并执行操作来实现接近限制条件的稳定生产。通过在监管控制流程顶端部署专家系统可以实现这一目标。另一方面，预见性维护可确保设备最长的正常运行时间和最大利用率。在这个概念中，机器学习算法和人工智能被用于检测和预测机器的故障或损坏，对正常作业模式的偏离，以及偏离最佳作业的程度。

1.1 人工智能选矿厂

目前，选矿厂中人工智能的主要用途是检测异常。下一项主要技术创新目标是建立选矿厂的数字孪生模型，以作为完全动态模型，以及应用人工智能来完全自动地控制作业流程。人工智能系统在最开始的时候需要花费较长的时间来学习如何加工矿物，以及获取和处理数据并改进算法。一旦系统开发完成，则人工智能系统将被集成到实时操作中，并以咨询模式对工厂进行运营，向操作人员提出建议。在经过全面测试后，人工智能系统将能够完全自动地运行工厂。

人工智能选矿厂将以最佳运营状态运行，以实现更稳定的生产，更低的安全或环境风险，以及对矿石特性或工艺参数的任何变化的更迅捷响应。人工智能将优化工厂运营的不同环节，以提高矿物加工的效率、回收率和盈利能力，还可以根据实际磨损和预测的组件磨损来预见性地维护设备。

现今，增强型的人工智能学习正处于模拟环境中的原型研发阶段。安德里茨（Andritz）公司是参与开发这种系统的公司之一，并且是#DisruptMining（采矿技术创新竞赛）2019年的获奖者。安德里茨公司表示，在加拿大黄金（Goldcorp）公司的支持下，他们将能够借助人工智能迈出从实验室到工厂的重要一步。

1.2 粗颗粒回收

粗颗粒回收（CPR）是指通过浮选方法回收粒度比正常矿物浮选粒度大2到3倍的颗粒（粗颗粒通常大于 $250\ \mu\text{m}$ 或 $0.25\ \text{mm}$ ，最大可达 $400\sim 500\ \mu\text{m}$ ）。粗颗粒浮选的上限一直是矿业行业面临的一项长期挑战，因为太粗而无法浮选的颗粒通常占流失到尾矿中的金属和矿物价值的4%。超细颗粒浮选仍然是矿物加工的必要部分。

半解离 (semi-liberated) 矿石浮选的优点是可用于粗颗粒矿石，从而减少磨矿成本和运营成本，以及生产出颗粒更粗、更干燥的尾矿产品，后者储存起来更容易且成本也更低，同时也减少了尾矿的含水量。



图1 用于粗颗粒回收的 Eriez HydroFloat 法

英美资源集团 (Anglo American) 已与大型化学企业合作，正在尝试采用新技术来回收这种以前无法回收的金属。据报道，粗颗粒回收技术将使该公司能够循环使用 80% 的生产用水。鉴于尾矿含水通常是矿山中最大的水量损失，因此这是一步重要的变革。

美国艺利 (Eriez) 公司利用其开发的 HydroFloat 分选器实现了粗颗粒回收技术的商业化。艺利公司是分选技术的领先者，设计研发了用于粗颗粒矿物浓缩的新型分选器。它在保持浮选设备选择性的同时，增加了重选的功能。该新型分选器使用新颖的充气系统将细密的气泡扩散到流化床 (fluidised-bed) 环境中，通过浮选与重选相结合显著提高了粗颗粒选择性回收的回收率。使用这种新型分选器，选矿工程师可以设计粗细分级处理流程，将其中的粗料与细料分开进行处理，以最大程度地提高效率。

同时，丹麦艾法史密斯 (FLSmidth) 公司的研发不仅专注于粗颗粒回收，而且还涉及如何与其他环节和创新融合起来，包括其他可通过减少流体扩散或分离碰撞和吸附子过程来减少滞留时间 (residence time) 和占地面积的浮选技术。

目前，还有一种用于斑岩铜矿的新型泡沫浮选机 (NovaCell) 正在研发

中。从浮选粒度的下限到基于石解离特性的粒度上限，它可以在很广泛的粒度范围内回收矿物颗粒。在一台设备中，细颗粒和粗颗粒在独立的环境中分别进行回收。最细的颗粒通过与高剪切充气机（high-shear aerator）产生的气泡的接触而被回收，而粗颗粒在温和的流化床环境中被气泡捕获。

Graeme Jameson 和 Cagri Emer 在一篇论文中描述了 Novacell 在斑岩铜矿浮选中的应用。结果发现，使用 4 台 NovaCells 浮选机作为粗选设备和一段精选流程，将有可能获得 99% 以上的铜回收率。在粗选作业中，约有 80% 的入料被作为粗颗粒脉石抛除，从而减少了精选作业前再磨的负荷。这可以节省约 40% 的磨矿动力和介质消耗成本。

NovaCell 产生了两种尾矿，其中一种已在流化床中经过脱泥处理，可以从浮选槽中得到固含量较高的尾矿浆，无需进一步脱水即可用于尾矿干堆。

1.3 电力破碎（electrofragmentation）

碎磨矿石以解离目标矿物是矿业行业中能量需求最大的环节，即能量使用的小幅减少也可能带来巨大的经济收益。SELFRAG 公司开发和推广的电力破碎技术，通过使用高压脉冲（HVP）发电机将连续的电流转换成脉冲。高压脉冲可使矿石内部产生裂纹/微裂纹而预先使矿石颗粒脆化，从而提高后续碎磨流程的能量效率和处理量。

随着能量效率的日益提高，该系统为矿物加工作业带来多项优势，包括及早抛尾和坚硬矿石的选择性破碎。该领域的发展也有可能解决目前不能经济开发的低品位复杂矿体的采选难题。

由于 SELFRAG 系统具有较高的选择性，所有矿物都会以其天然存在的粒度解离。SELFRAG 系统解离出的金属矿物颗粒比传统碎磨流程的粒度

粗，从而无需将所有岩石研磨至目标尺寸。矿石中脉石的早期分离可以实现电力破碎矿石的预富集，并减少低价值物料的运输。高压破碎技术可以降低细粒矿石比例，进而减少矿石在尾矿中的潜在损失。



图2 SELFRAG 电碎机

澳大利亚纽克雷斯特（Newcrest）矿业公司正在与昆士兰大学合作测试高压脉冲技术在选择性地破碎含导电矿物矿石中的应用。

1.4 原位铜浸出

原位浸出或原位回收（ISR）是使溶液在岩体中循环流动以回收所得到的浸出液进行下一步处理的过程。溶液在循环时，根据溶液的不同组成可以溶解特定矿物。就铜而言，所用溶液为弱硫酸，类似于氧化铜的典型堆浸液。所得浸出液随后进入溶剂萃取-电解沉积（SX/EW）厂中进行处理。

原位浸出并不是一项新技术，它用于铀矿开采已有 50 多年的历史。现今，近 50% 的铀矿仍采用这种方法进行开采。1995 年，必和必拓（BHP）在其位于亚利桑那州的 San Manuel 铜矿进行了原位浸出试验和应用。必和必拓拥有的另外两个项目，即 Pinot Valley 和 Miami Unit 也使用了原位铜浸出技术。现在，正在应用新技术来扩展原位浸出的潜在用途。

原位铜浸出技术仅限于具有足够渗透性且矿物学特征适合浸出的矿床。这些早期矿山应用的原位浸出技术仅用于处理矿石开采产生的细碎矿石。天然裂隙岩石的渗透性差，使得原先原位铜浸出过程的回收率低。但是，随着定向钻进、水力压裂和新型注水系统等油气采收方面技术的新进展，

目前可以通过钻孔抽采，实现深部铜矿的原位浸出。

加拿大塔塞科 (Taseko) 公司拥有美国亚利桑那州的 Florence 原位铜回收项目。在取得了所有最终许可后，第一阶段的建设于 2017 年 9 月获得批准。第一阶段的设施包括 24 口注入井、回收井和监测井以及一个溶剂萃取-电解沉积厂，并且已于 2018 年第三季度按时和按预算完工。2018 年 12 月，开始了井场作业，注入和回收系统在很短的时间内就全面见效。该公司计划将测试设施运行 12 个月，并预计在 2019 年中期开始商业生产的许可证修改流程。Florence 项目的装机性能为 4700 美元/t，是资本节约度最高的铜项目之一，其运营成本为每磅 LME 级阴极铜 1.10 美元。该公司的目标是在 20 年的矿山使用寿命中平均年产铜 8500 万磅 (3.9 万吨)。



图 3 Florence 铜生产测试设施和井场

同时，卓越 (Excelsior) 矿业公司正在利用原位铜浸出技术在亚利桑那州建设其 Gunnison 铜项目，第一批铜产品计划于 2019 年第四季度产出。Gunnison 项目预计在 24 年的使用寿命中平均年产铜 9100 万磅，直接运营成本为 65 美分/lb，总成本为 1.23 美元/lb，初始资本成本为 4900 万美元。

在欧洲，由欧盟地平线 2020 计划资助的 BIOMOre 项目，旨在通过结合溶液采矿 (solution mining) 和生物浸出两种方法从欧洲的深部矿化带提取金属。为此，开发和优化了生物地球化学和地质工程方法和模型，并且

设计和建造了专用设备。该项目的关键组成部分是设计和建造试验工厂并在地下环境中运行。来自欧洲 8 个国家、加拿大和南非的项目合作者提供了科学和技术意见。在波兰 KGHM 公司 Rudna 铜矿的 Kupferschiefer 矿体中进行了试验，并发表了多篇技术论文，目前相关研究还在继续。

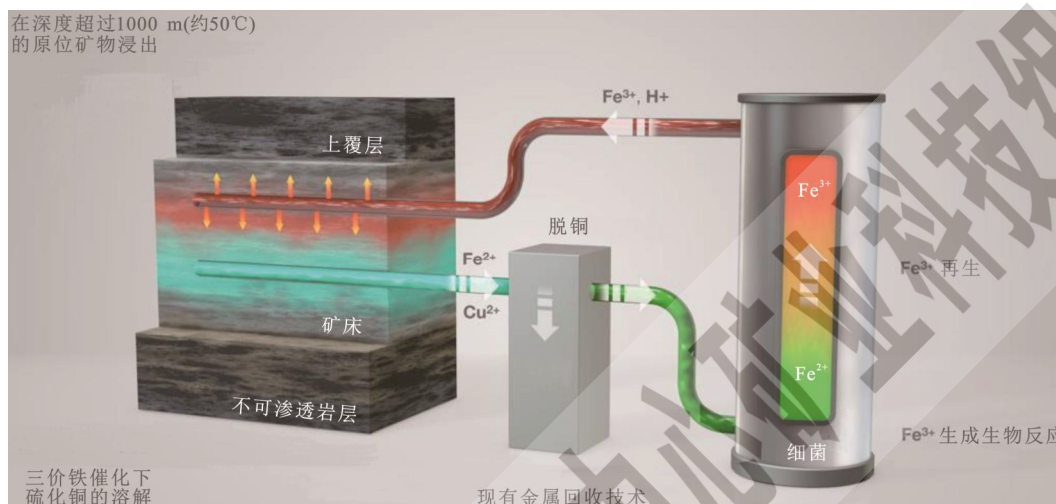


图 4 BIOMore 生物浸出过程方案

1.5 现场制造氰化钠

美国安进 (Synergem Met) 公司建立了一个模块化工厂，用于在矿场生产氰化钠 (NaCN)。该工厂消除了与使用氰化物相关的一系列危险活动，如运输、现场处理、以及维护大量氰化物库存。该厂还为偏远地区的一些黄金生产商提供了供应保证，同时降低了法规合规成本。

美国安进公司的氰化钠工厂是用于生产氰化钠的模块化独立生产工厂。每个工厂的大小都是 40 ft 标准运输集装箱大小且易于运输。第一家工厂位于澳大利亚的一个矿山，经过了 6 年多的严格建设和测试。该公司表示，以目前的氰化钠市场价格，该技术可将运营矿场的药剂成本降低多达 50%。

1.6 不含氰化物的金的提取

Clean 矿业公司正在推广一种具有创新性和成本效益的矿物加工技术。该技术以更安全、危害更小的化学试剂硫代硫酸盐代替氰化物。这种无机

化合物有助于将细粒金从矿石中溶出，然后通过进一步处理将其回收。

Clean 矿业公司的新技术反映了澳大利亚国家科学机构——联邦科学与工业研究组织 (CSIRO) 在这十年来的发展。Clean 矿业公司的母公司 Eco Minerals Research 于 2018 年与 CSIRO 合作建立了第一座 Clean Gold 选矿厂，以在工业环境中完善和测试该技术。在该工厂获得成功之后，Clean 矿业公司与 CSIRO 协商确定了专利权，以在全球范围内推广和销售这种新型无氰化物黄金选冶技术。

从环境和认知的角度来看，在黄金回收过程中消除氰化物和相应的尾矿坝对于该行业而言可能意义重大。Clean 矿业公司最初将针对中小型采矿企业，使其通过经济高效的浸出矿石处理解决方案受益，包括可定制和扩展以满足个性化需求的即装即用式工厂 (plug and play plant)。这项新技术适用于新的待开发矿场，无法使用或禁止使用氰化物的场地，以及希望升级和过渡到新技术的现有矿山。

硫代硫酸盐是一种无机化合物，不易燃且易溶于水。尽管之前也提出过类似的化合物，但 Clean 矿业公司的该项技术适用于采矿运营商的一系列矿石。该公司总结出了该技术的以下优点：

- (1) 更安全且可行的替代氰化物的矿物加工方法；
- (2) 可应用于许多不同类型矿石的解决方案；
- (3) 可与氰化物媲美的金回收率；
- (4) 低成本且可规模化生产的矿物加工流程；
- (5) 整体可移动或固定式矿物加工流程；
- (6) 简化的金回收过程；
- (7) 无氰化物污染的尾矿坝。

回路中的研磨设备与基于氰化物的设备相同，因此该新技术仅适用于

从浸出到金回收的阶段。此外，可增加脱水流程来进行尾矿干排。Clean 矿业公司向矿场提供金回收过程中所使用的药剂和所有其他化学药品。专供药剂是一种优质的化学配方，专为满足矿场和矿石类型而设计，以确保最佳的金回收率。

1.7 新型纳米提金技术

与此同时，美国的 6th Wave Innovations 公司正在推广 IXOS 纳米技术用于金的提取。目前，绝大多数金矿使用椰子基活性炭（AC）从氰化物浸出液中回收金。金矿通常使用炭浆法、炭浸法和炭柱法提取金。近年来，这些系统不断得到改善，但活性炭具有自身局限性。金的吸附能力在很大程度上取决于矿石的冶金工艺、活性炭的品质、母液（pregnant solution）pH 值、以及其他因素。

6th Wave Innovations 公司设计了可根据金属颗粒的大小、形状、电荷和溶解形态将金属离子彼此分离的聚合物微珠（polymeric beads）。IXOS 是一种纳米树脂技术，专门设计用于从含金矿石的碱性氰化物处理液中回收氰金酸盐（dicyanoaurate）。基于 6th Wave Innovations 公司开发的独特技术，该树脂具有极高的负载量（约 30 g/kg），对金的选择率超过 97%，并且不受母液中其他金属的影响。

据报道，IXOS 纳米技术在多种条件下均有稳定且可预测的表现。不管其他贱金属的有无和含量多少，金的回收率和选择率仍显著高于活性炭。此外，机械强度优于活性炭，几乎可以 100% 提取金，而且不会损失细粒金。IXOS 微珠不会受到贱金属的影响，可以完全洗脱，并且可重复使用几十个循环周期。

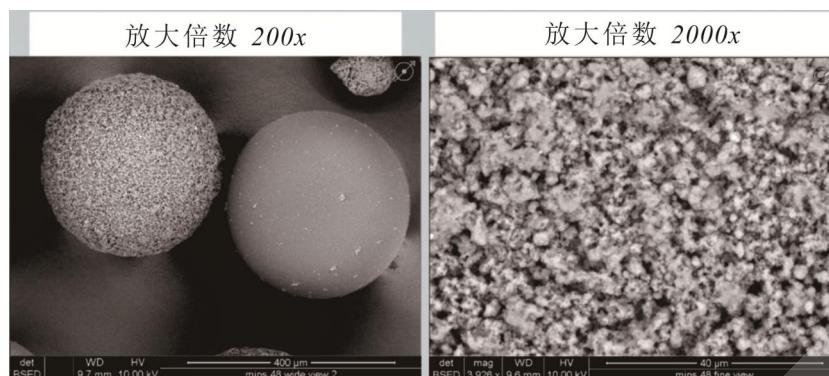


图5 显微镜下的 IXOS 纳米树脂

该公司总结出了该技术以下优点：

- (1) 具有节省超过 100 美元/oz 的潜力；
- (2) 提高金回收率（相比活性炭，不损失细粒金和浸出液）；最近的现场测试表明，回收的金多出 10%，溶液损失基本为零；
- (3) 更高的回收率和选择率意味着工厂规模更小及运营成本更低；
- (4) 在多次循环周期内性能没有明显波动；
- (5) 被证明对劫金矿石（preg-robbing ore）非常有效；
- (6) 在低温和常压下可一次性洗脱；
- (7) 不需再生/重新激活。

6th Wave Innovations 公司在美国一家大型黄金生产商中有一家试验工厂正在运营，还与其他矿山和加拿大研发机构正在筹划相关项目，旨在开发其他类型的 IXOS 微珠来从硫代硫酸盐浸出液中提取汞、锂、金等。

1.8 锂云母利用新技术

锂行业仍然是一个特别活跃的市场领域，随着锂在可再充电电池中的使用不断增长，锂行业有望继续发展。传统的物料来源是锂辉石和卤水。伟晶岩锂矿通常具有复杂的矿物学特征，锂存在于一种以上的矿物相中。商业性锂辉石精矿（spodumene concentrate）的产品规格排除了其他锂矿杂质，这意味着锂云母、方铁矿、闪锌矿、锂霞石等被作为尾矿丢弃。在某

些情况下，这可能导致锂资源的损失高达 30%。满足商业交易的锂辉石精矿的高质量规格标准可能使资源浪费更加严重。直到如今，锂云母和磷酸盐类矿物仍很少引起商业关注。

然而，澳大利亚的 Lepidico 公司和澳洲锂业公司（Lithium Australia）已在开发新的解决方案，以从这些被忽视的含锂矿物中提取碳酸锂。

Lepidico 公司的湿法冶金 L-Max 工艺包括锂云母的直接常压浸提（direct atmospheric leaching）、除杂阶段、以及随后的碳酸锂沉淀。它与锂辉石的加工有很大的不同，后者需要在锂回收之前进行高温破碎（decrepitation）和硫酸盐焙烧（roasting）。与现有的锂回收方法相比，这种新颖的方法更简单并且能量消耗也有望更低。锂云母的加工流程还可以生产钾、稀有金属和硅酸盐等副产品，从而弥补碳酸锂生产的运营成本。



图 6 Lepidico 公司的试验工厂

该处理工艺已在一系列实验室测试和连续运转的小型工厂中进行了广泛试验。伟晶岩矿石中的锂云母可以通过浮选法得到有效富集，并且锂的回收率较高。锂云母的浸出可以在相对较短的浸出时间内实现很高的溶解率。

几个选冶测试工作项目的结果还表明可用这些云母物料生产电池级碳酸锂和含钾肥料。此外，与其他锂提取工艺不同，L-Max 工艺不需要大量的土地用于建造蒸发池，也不需要昂贵的火法冶炼处理环节来提取和回收

有价值的锂。

此外，Lepidico 公司正在推广 LOH-Max 工艺，可从硫酸锂中生产高纯度氢氧化锂。据报道，许多客户需要氢氧化锂而不是碳酸锂，通过使用 LOH-Max 工艺，氢氧化锂可以直接由 Lepidico 公司的专有技术 L-Max 工艺的中间产品硫酸锂生产。

同时，澳洲锂业公司开发了 SiLeach 工艺，可从各种锂原料中回收所有重要的金属价值，并且能耗低、回收率高、以及副产品多。除了从硅酸盐中回收锂之外，SiLeach 工艺还具有更多用途。例如，已对难处理的金矿石进行了测试，以从矿石中去除硅质脉石矿物，然后再通过氰化物提取金。

使用 SiLeach 技术，采用硫酸和卤化物组合可在常压下破坏硅酸盐晶格中的强键，这意味着仅需简单的设备即可实现。在约 90°C 时发生快速反应，这使得该技术在工厂占地面积受限且降低资本成本方面具有明显优势。此外，与常规处理不同，采用 SiLeach 技术的目标矿物中的所有金属均是可溶的，从而有机会生产多种副产品。

1.9 红土镍矿提取技术

Direct Nickel 公司开发了一种 DN_i 工艺并获得专利，可从红土矿中回收金属。该公司在澳大利亚珀斯的试验工厂证实了硝酸回收工艺专利从红土镍矿中提取钴、镍等金属的有效性。2018 年 10 月，Direct Nickel 公司与昆士兰太平洋金属（Queensland Pacific Metals）公司签署了框架协议，以应用其技术为电动汽车电池市场生产硫酸镍和硫酸钴。

DN_i 工艺使用硝酸从红土镍矿及其他工艺的尾矿和废料（包括铁镍厂生产的炉渣）中溶解和回收所有有价值的金属。DN_i 工艺独特且受专利保护的部分是 95% 的硝酸能够被循环利用（只有 5% 的硝酸残留在富氮残渣

中)。

DNi 工艺最初是为钢铁行业生产产品而开发的，但其灵活且智能的化学特性使 DNi 工艺能够生产出最适合用于电动车电池市场的精炼产品，主要是镍和钴，还能够生产出许多其他有价值的产品，如赤铁矿和氧化镁。

DNi 工艺可以处理整个红土镍矿剖面、褐铁矿、腐泥土以及任何可能存在的过渡带，从而使矿山的利润最大化。它是一种十分灵活的工艺，能够适应不断变化的市场需求，可以生产镍金属或电池前驱体（如硫酸镍、硫酸钴和氧化钴）、氢氧化镍钴（MHP）或 MOP，也可以提取任何可溶于硝酸的金属。DNi 工艺还可以应用于处理矿山尾矿及火法冶金工艺的废品（需通过测试确认）。

DNi 工艺不需要高压或高温，也不需要特殊材料来建造，工厂规模下的镍产量最小阈值约为每年 5000 t，这远远小于同类竞争技术所必须的入门级工厂规模。该公司报告说，这种工艺将比目前用于生产镍、钴和其他副产品的任何技术都具有更低的成本。

2 水处理

水对于矿石采选来说必不可少，但它是一种有价值的商品，通常供应还会受到限制。为了从矿石中提取和回收有价值的金属，水被用于采选各个环节。据计算，生产 1 t 黄金平均需要超过 700 m³ 的水。在矿场，选矿厂对水的消耗量最大，而最大程度地减少水流失（减少新供应水）的唯一机会就是尾矿管理设施。在标准的矿石采选作业中，会利用大量水对矿山尾矿进行浓缩。矿业企业能够提取其中一部分水进行再利用，但是很多水分随着蒸发而损失。

矿业企业目前正在研发相应方法来减少流程中的用水量，以设计尽可

能长时间保持流程中物料干燥的方法，也正在评估尾矿储存的方法，以利用更少的水及保存已处于流程中的水。

基于无水矿山的概念，英美资源集团正在通过闭路方法来解决对水依赖的问题。这种密闭系统的方法旨在通过直接的水循环和再利用来提高用水效率。为此，该公司将其创新性工作集中在两个领域：蒸发测量和干尾矿（废料）处置。

2.1 有机微生物处理

来自大气降水和径流的水会流过采矿留下的岩矿堆（rock pile），可以将硒等物质带入当地的集水区。如果这些物质的浓度过高，则会影响敏感的水生生物种群。为了应对这一挑战，Teck 公司研发并测试了饱和岩石填充（saturated rock fills）技术，该技术利用有机微生物对加拿大不列颠哥伦比亚省 Elk Valley 地区受采矿活动影响的水体进行了处理。截至目前，该试验项目已经证明约 90% 的硒和硝酸盐可被饱和岩石填充技术中的微生物去除。

2.2 节水分选技术

大地工程开发集团的子公司天津美腾科技公司开发了一种智能煤炭干式分离技术，即智能干选机（TDS）。煤在封闭的输送系统上进行单层输送，并且基于 X 射线和图像识别技术将煤与脉石矿物（gauge）分离。该技术实现了完全自动化和模块化，具有自我诊断系统，可以对现有各种规格的煤炭加工厂进行改装。分选精度接近重介质湿式分选机（需要在水中浸泡粉状硅铁或磁铁矿），远高于 ROM-jig 型、jig 型等干法分选设备。

2.3 尾矿干堆

将尾矿储存在尾矿库中的另一种方法是通过过滤将尾矿脱水（脱水率约85%），以产生一种饼状物质，然后通过传送带或卡车将其运输到储存场地。这是管理尾矿的一种低风险和对环境-社会友好的替代方案。这类尾矿可稳定储存，通常不需要挡土墙，被称为“干堆”。通过使用皮带、滚筒、水平或垂直堆叠式压力板以及真空过滤系统的组合来生成干燥物质。



图7 智能干式分离器

干堆式尾矿的潜在优势包括：

- (1) 可以进行水的回收和再利用；
- (2) 过滤后的尾矿含有足够的残留水分利于滤饼优化压实；
- (3) 与传统尾矿储存设施相比占地面积减小；
- (4) 渗漏率显著低于含水尾矿库；
- (5) 在寒冷气候条件下，可防止传统含水尾矿库遇到的管道结冰和结霜问题；
- (6) 可同时进行尾矿回收；
- (7) 干堆式尾矿设施被认为更易于获得审批。

然而，除非水量损失威胁到选矿厂的运转或者水资源难以为继，否则仅为节约用水很少采用干堆方法。不使用干式尾矿储存设施的其他因素还包括可能导致地下水渗入河流或海洋而造成污染。

干堆式尾矿的潜在缺点包括增加作业设备而导致的较高资本和运营成

本。此外，由于大型过滤厂的设备成本和运营管理，尽管随着现代化过滤系统处理量的提高（增加水平过滤带的过滤面积）和工艺改善（如最小化滤布的盲孔），尾矿过滤系统的经济性已得到大幅改善，但目前的干堆式尾矿技术仅适用于处理量小（ <20000 t/天）的工厂。

干堆式尾矿技术的能否成功取决于过滤设备的性能（类似于浓缩设备的性能），受矿石矿物学特性和加工处理特点变化的影响。这些因素可能对过滤速率和最终含水量有重要影响。

芬兰奥图泰（Outotec）公司还为干式尾矿开发了新的预定设计工厂产品，包括干尾矿厂。这是一个完全集成的设计，包括用于尾矿干堆的浓缩、过滤和干物料处理，以及所有必需的辅助设备和系统。

奥图泰公司还提供尾矿浓缩厂设计，以用于管理和储存选矿厂的尾矿。在沉淀之前，在浓缩机中回收生产用水，将糊状物料泵送到处置区进行最终处理，或者将其与粘结剂混合之后在矿井中回填以稳定采场。除浓缩机外，该工厂还包括进料系统、溢流和底流泵送与管道系统、压盖水系统（gland water system）、絮凝剂进料系统、以及仪表和控制系统。

加拿大金罗斯（Kinross）公司在智利的 La Coipa 矿山使用了干堆技术来处理尾矿。据报道，英美资源集团在其智利的铜矿山中结合了粗颗粒回收和干堆技术，并正在将其 El Soldado 矿山作为测试中心来试验新产品和新想法。

同时，加拿大黄金公司目前正在其 Eléonore 矿山开展尾矿过滤，并在其已关闭的 Marlin 和 El Sauzal 矿山综合利用已过滤的尾矿。加拿大黄金公司正在与 FLSmidth 公司共同开发一种名为 EcoTails 的矿山废料管理技术。EcoTails 是快速过滤的尾矿与废石混合而成的混凝品，在运输过程中进行混合从而形成一种在地质工程上性能稳定的材料（被称为 GeoWaste）。

该工艺技术消除了将常规泥浆尾矿保持在尾矿坝中并用水浸泡的需要。EcoTails 解决方案可以重复使用 90%~95% 的生产用水。此外，GeoWaste 比干堆式尾矿更结实且更干燥，并且有望大大降低环境风险。加拿大黄金公司正在其 Peñasquito 矿山实施针对完整原型系统的工程可行性研究。

2.4 尾矿坝革新

在 2019 年初，巴西发生了 Brumadinho 尾矿坝灾难性事件之后，巴西政府宣布禁止在河流上游新建尾矿坝，并下令在 2021 年 8 月之前所有现有的上游尾矿坝都要停用。巴西矿业监管机构的这一举动将涉及 84 处上游尾矿坝，仅米纳斯吉拉斯州的采矿核心区就有大约 50 个。同时，涉事尾矿坝的运营商淡水河谷（Vale）宣布投资 15 亿雷亚尔（合计 3.9 亿美元）用于实施干堆技术，因为该公司正在采取措施来减少对尾矿坝的依赖。到 2023 年，淡水河谷将依靠干法生产其 70% 的产品，而 2014 年时仅为 40%，2018 年时为 60%。

美卓公司作为一家领先的业内企业，指出其 2018 年产生的尾矿中仅约 5% 被脱水成浓缩尾矿或干尾矿，但预计到 2025 年，这一比例将有望增加到约 13%。

加拿大黄金公司正在测试新的尾矿坝监测技术，该技术将最终改善尾矿储存设施的管理。自动化监测系统包括太阳能电源、数据记录仪、无线电监测站、自动观测站、气象站、数字摄像机、以及战略性部署的传感器和棱镜，以监测和掌握有关水位、孔隙水压力、坝体结构完整性、以及确保坝体安全和可靠性的其他重要参数。

资料来源：RFC Ambrian. Report 5— Mineral Processing & Water Treatment. 2019.9, <https://www.rfcambrian.com/index.php/2019/09/11/report-5-mineral-processing-and-water-treatment/>.

版权及合理使用说明：

为了遵守国家知识产权的相关法律法规，保护知识产权，保障著作人的合法权益，中国地质调查局地学文献中心（中国地质图书馆）就《国际地学动态》的使用，要求参阅人员及研究人员认真遵守《中华人民共和国著作权法》的有关规定，严禁将《国际地学动态》用于任何商业用途或其他营利性用途。如用于读者个人学习、研究目的的单篇信息报道稿件，应注明版权信息和信息来源。任何单位要链接、整期发布或转载相关专题的《国际地学动态》内容，应向中国地质调查局地学文献中心（中国地质图书馆）地学情报研究室发送正式的需求函，说明其用途，征得同意，并在使用时注明版权信息和信息来源。

欢迎对中国地质调查局地学文献中心（中国地质图书馆）《国际地学动态》提出宝贵的意见和建议。

国际地学动态：矿产资源

2020年第2期

（2020年2月14日出版，印数1400册）

本刊由“国际地质调查动态跟踪与分析（DD20190414）”项目支持

编委会主任：刘延明

编委会副主任：刘三意

主 编：田黔宁 张 炜

执行主编：吴西顺

责任编辑：吴西顺

审 核：张 炜

地 址：北京市海淀区学院路29号

邮 编：100083

联系电话：（010）66554879

传 真：（010）66554882

电子信箱：gjdxdt@cgl.org.cn

单位主页：<http://www.cgl.org.cn/>