

“萨斯喀彻温工艺”耦合智能三环窑活化煅烧技术高值化处置

加拿大蒂斯代尔高铝燧石综合解决方案

——面向加拿大合作方的技术推介与合作规划

本方案旨在提出一套针对加拿大萨斯喀彻温省蒂斯代尔（Tisdale）地区丰富的高铝燧石资源，以生产电解铝为核心目标，并实现资源“吃干榨净”式全利用的颠覆性技术路径。该路径的核心，是将加拿大本土的“Saskatchewan Process”酸法提铝技术，与山东和宁顺窑业股份有限公司拥有的、国际领先的“智能三环窑活化煅烧系统”进行深度融合。通过智能三环窑颠覆性的“块料直烧、精准活化”技术，从源头上彻底重塑传统工艺的前端环节，实现“前端投资减半、煅烧能耗降低 60%、铝回收率提升、硅基联产品价值提升 N 倍”的跨越式突破。本方案将详细阐述融合后的全新技术路径、流程图，并系统分析其“1+1>2”的突出表现，旨在向加拿大合作方展示一条技术上无比先进、经济上极具竞争力、环保上堪称典范的合作开发之路，共同开创非铝土矿提铝技术的新纪元。

一、Saskatchewan Process 技术解析及其传统瓶颈

“Saskatchewan Process”是由萨斯喀彻温省研究理事会（Saskatchewan Research Council, SRC）开发，专门针对高岭土类矿物（如高铝燧石）的酸法提铝工艺。其基本原理和流程如下：

- 1. 原矿石预处理：**根据矿石的李氏硬度决定，将高铝燧石原矿分级破碎、磨粉至 10-20 目的粒度（物料的李氏硬度与加工的粒度目数成正比）；
- 2. 传统煅烧活化：**将加工好高铝燧石（主要成分为高岭石， $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）粉粒在传统窑炉（如回转窑）中加热至 650-850℃，脱去结构水，将其转化为具有化学活性的无定形偏高岭土（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）；
- 3. 盐酸浸出：**使用浓盐酸（HCl）对活化后的偏高岭土进行浸出。活性氧化铝（ Al_2O_3 ）与盐酸反应生成可溶性的三氯化铝（ AlCl_3 ），而二氧化硅（ SiO_2 ）则基本不反应，以固体形态保留；
- 4. 除杂与纯化：**浸出液中通常含有铁等杂质离子（如 FeCl_3 ），需通过溶剂萃取或其他化学方法将其分离出去，得到纯净的三氯化铝溶液；

5. 结晶与分解：向纯化的三氯化铝溶液中通入氯化氢气体，使其结晶析出六水合三氯化铝（ $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ）。随后，将晶体在特定温度的煅烧炉中进行热分解，最终得到冶金级氧化铝（ Al_2O_3 ），同时回收氯化氢气体循环使用；

6. 电解制铝：将冶金级氧化铝送入电解槽，进行霍尔-埃鲁（Hall - Héroult）法电解，生产出金属铝。

传统工艺的核心瓶颈分析：

Saskatchewan Process 在化学原理上是成熟的，但其整体经济性和环保性受制于**第一、二步——原矿石预处理、传统煅烧活化**。高硬度对燧石预处理和使用传统回转窑等设备进行上述工序存在三大根本性难题：

高昂的预处理成本：传统窑炉无法处理大尺寸块状物料，必须将坚硬的燧石进行多级破碎、细磨至粉状或小颗粒状态，此过程设备投资巨大、能耗惊人、粉尘污染严重。

煅烧效率低下且不均匀：传统窑炉热效率普遍低于 50%，热量散失严重。更关键的是，其传热方式导致粉料受热极不均匀，极易出现部分物料“外焦内生”（外部过烧形成惰性相，内部活化不彻底）的现象，物料活化程度不足 70%，导致产品活性低且波动大（灼减率常在 3-8%），直接影响后续酸浸环节的铝溶出率和酸耗。

环保压力巨大：传统窑炉的开放式或半开放式结构，导致烟气和粉尘的无组织排放问题突出，末端治理成本高昂，难以满足日益严格的环保法规。

这三大瓶颈，正是智能三环窑技术可以完美解决并实现颠覆性优化的切入点。

二、革命性核心装备——智能三环窑活化煅烧系统

智能三环窑是中国山东和宁顺窑业股份有限公司拥有完全自主知识产权的颠覆性重大热工装备，它从根本上重构了块状、非均质物料的煅烧逻辑，其核心优势与本项目需求完美契合：

1. “块料直烧”的颠覆性工艺：智能三环窑全球首创的核心技术，可直接处理 3-30 厘米的大尺寸块状物料。应用于蒂斯代尔项目，意味着燧石原矿仅需进行简单的一级破碎和筛分（例如，筛选出 1-7cm 的块料），即可直接入窑，彻底省略了传统工艺中成本高昂且能耗巨大的二次破碎和精细研磨系统，极大简化了前端工艺，节省了巨额的设备投资和运营成本。

2. **“精准活化”的质量保障**：该窑炉通过独特的“三温区梯度加热”与“闷烧均化”技术，实现了对物料活化过程的极致精准控制。

三温区阶梯活化：窑体垂直设计了预热、分解、活化三个温区，确保燧石块料在最佳的温度曲线下，温和、均匀、深度地完成从高岭石到高活性偏高岭土的转变，**物料平均活化率超过 95%**。

闷烧均化技术：窑底长达 24-36 小时的缓冷均化段，利用物料自身余热完成残余反应，彻底解决了块料“夹生”的百年难题，**确保产品质量高度均一，灼烧减失率（LOI）稳定低于 1%**，远优于传统窑炉 3-8% 的水平。这将直接转化为后续酸浸环节更高的铝溶出率、更短的反应时间和更低的酸耗。

3. **“闭路循环”的能效革新**：智能三环窑通过精密的四级余热闭路循环系统，将热能“吃干榨净”，**综合热效率高达 85.2%**，是传统回转窑（<50%）的 1.7 倍以上。这意味着煅烧同样数量的燧石，**能耗成本可降低 40-60%**。回收的余热还可用于原料烘干、蒸汽发电（可配套 3.2MW 发电机组）等，进一步降低全厂的运营成本。

4. **“近零排放”的环保友好**：该系统将环保内嵌于工艺之中，通过湿法活化脱硫、重金属玻璃体固化、纳米纤维袋滤等多项技术集成，实现了 SO₂、粉尘等污染物排放远优于最严苛的国际性标准，完全符合加拿大对环境保护的高标准要求，将极大简化项目的环评流程和降低环保投资。

三、深度融合的“Saskatchewan-和宁顺”全新技术路径

以生产高纯铝为第一目标，并实现全部资源高值化利用，我们规划出如下五大工段构成的全新“吃干榨净”式技术路径：

第一工段：原料预处理与智能三环窑高效活化段

目标：以最低成本制备出成分稳定、高化学活性的偏高岭土熟料。

流程：

1. **粗破与筛分**：将开采的蒂斯代尔高铝燧石原矿，通过一级破碎机和振动筛，处理成 1-7cm 的块料。大于 7cm 的返回破碎，小于 1cm 的细料则直接送至第四工段作为硅基材料的原料。

2. **预均化堆场**：合格块料进入预均化堆场，通过“平铺直取”的方式混合均匀，确保入窑物料的化学成分稳定。

3. **智能三环窑活化煅烧：**均化后的燧石块料被送入智能三环窑。在窑内经历预热脱水区（约 120-350° C）、核心分解活化区（约 700-900° C）和冷却定型区。高岭石晶格被充分、均匀地分解为高活性的无定形偏高岭土（活性 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ），物料活化率超过 95%。窑尾余热全部被回收利用。

第二工段：选择性酸浸提铝与固液分离段

目标：利用盐酸选择性溶解活性氧化铝，实现铝、硅组分的高效分离。

流程：

1. **活化料冷却与输送：**从智能三环窑排出的高活性熟料经冷却后，直接输送至酸浸工段。注意：此处无需像碱法工艺那样进行精细粉磨，仅需破碎至适宜反应的粒度即可，甚至可直接使用小颗粒熟料，进一步降低成本。

2. **盐酸浸出反应：**在耐腐蚀反应釜中，将活性熟料与再生及补充的浓盐酸混合。由于熟料活性极高，反应可在较温和的条件下快速进行。活性 Al_2O_3 迅速反应生成可溶性的 AlCl_3 ，而高稳定性的无定形 SiO_2 则保留在固相中。

3. **固液分离：**反应后的料浆经过压滤或沉降槽，分离出富含 AlCl_3 的浸出液（粗液）和富含 SiO_2 的固体残渣（硅渣）。

第三工段：高纯氧化铝产品制备段

目标：从浸出粗液中制备冶金级氧化铝，并实现酸的闭路循环。

流程：

1. **除铁纯化：**采用先进的溶剂萃取或离子交换技术，高效脱除浸出液中的 Fe^{3+} 等杂质离子，得到高纯度的 AlCl_3 溶液。

2. **结晶与分离：**向纯净的 AlCl_3 溶液中通入来自后续煅烧工序回收的 HCl 气体，利用同离子效应使其“盐析”结晶，生成高纯度的 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶体。

3. **晶体煅烧：**将 $\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 晶体送入专用的分解炉中，在约 1000-1100° C 的温度下进行煅烧，分解生成冶金级氧化铝（ Al_2O_3 ）粉末，同时释放出高浓度的 HCl 气体。

4. **酸循环：**将煅烧产生的 HCl 气体经冷却、吸收后，返回至结晶工序和浸出工序，实现酸的高度闭路循环，极大降低酸耗和生产成本。

5. 电解制铝：将产出的冶金级氧化铝进入电解铝工序，生产金属铝锭。

第四工段：硅基联产品全系高值化利用段

目标：将第二工段分离出的硅渣“变废为宝”，开拓高端硅基新材料产业链，实现“零固废”。

流程：

1. 硅渣洗涤与纯化：来自第二工段的硅渣经过多次逆流洗涤，彻底去除夹带的氯化物，得到高纯度的湿法无定形二氧化硅。

2. 高端产品制备：基于这种高纯度、高活性的二氧化硅原料，可开拓以下一条或多条高附加值产品线：

纳米硅溶胶：通过特定的化学处理，可制备粒径可控的纳米硅溶胶（如 $28\pm 3\text{nm}$ ）。这是半导体芯片化学机械抛光（CMP）工序的核心研磨液，市场价值极高，可打破现有的技术垄断。

高端白炭黑：经沉淀、过滤、干燥后，可制备比表面积超过 $200\text{m}^2/\text{g}$ 的高性能白炭黑。其补强性能远超传统产品，是制造绿色节能轮胎的关键材料。

硅碳负极材料：将二氧化硅进一步还原并与碳材料复合，可制备出比容量超过 550mAh/g 的硅碳负极材料，远超传统石墨负极（ 372mAh/g ）。这是解决下一代高能量密度动力电池“里程焦虑”的关键方案。

LC3 低碳水泥原料：即使作为最基础的应用，这种高活性的无定形二氧化硅也是生产 LC3 低碳水泥的理想“煅烧粘土”原料，可替代高达 50% 的水泥熟料，使水泥生产过程减碳 40% 以上。

第五工段：系统性循环与近零排放段

目标：整合全厂的能源流与物质流，实现极致的资源利用和环境友好。

流程：

1. 能源梯级利用：智能三环窑回收的余热，优先用于烘干燧石原料（如有需要）、硅渣产品，或驱动余热锅炉发电，为全厂提供廉价的电力和蒸汽。

2. 物料闭路循环：盐酸在第二、三工段实现超过 98% 的闭路循环。工艺水经处理后大部分实现循环利用，外排废水极少。

3. **废气达标排放：**全流程的废气，特别是来自智能三环窑和氧化铝分解炉的废气，均经过高效处理，确保所有排放指标远优于加拿大环保标准。

四、融合方案的“1+1>2”突出表现

将智能三环窑技术融入 Saskatchewan Process，绝非简单的设备替换，而是对整个产业链的系统性重构与价值跃升。

1. **前端工艺的革命性简化，固定资产投资显著降低：**凭借“块料直烧”能力，彻底取消了昂贵、复杂、高能耗的二级破碎与精细研磨系统，预计可使前端部分的设备投资降低 40%以上，并大幅缩短建设周期。

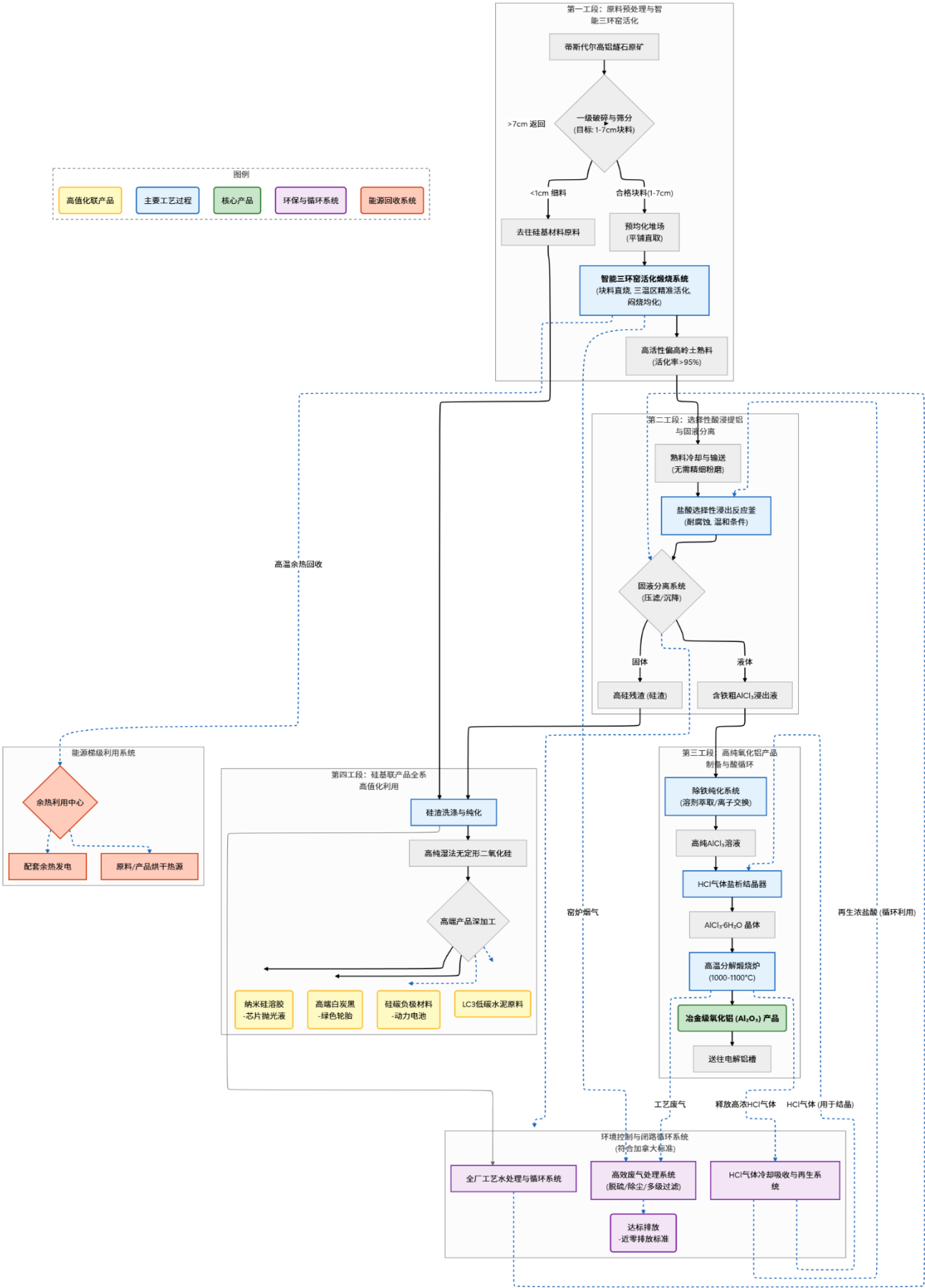
2. **核心能耗的颠覆性降低，运营成本优势巨大：**智能三环窑 85.2%的综合热效率，使燧石活化煅烧的单位能耗降低 40-60%。结合余热发电和酸的高度循环，使整个工厂的能源成本和原料成本极具市场竞争力。

3. **主产品收率与质量的显著提升：**智能三环窑产出的高活性、高均一性的偏高岭土熟料（活化率>95%，灼减率<1%），将确保在酸浸工段获得**更高、更稳定的铝溶出率**（预计可达 95%以上，高于传统工艺），从而提升最终电解铝的总收率，并可能因产品质量稳定而降低后续纯化难度。

4. **联产品价值的指数级增长，“零废弃”变为“全宝藏”：**传统工艺产生的硅渣多被视为低价值固废。而本方案通过精准活化和高效分离，获得了高纯度、高活性的二氧化硅，为开拓半导体、新能源等战略性新兴产业所需的前沿硅基材料奠定了基础。联产品的价值从几百加元/吨，跃升至数千甚至上万加元/吨，其创造的利润可能与主产品氧化铝相当，彻底改变了项目的盈利结构。

5. **全流程绿色低碳的卓越表现，契合全球可持续发展趋势：**从节能 40-60%的煅烧源头，到生产 LC3 水泥等低碳材料的末端，整个工艺路径的碳足迹远低于任何传统路线。结合近零排放的环保性能，使该项目不仅是一个经济项目，更是一个符合 ESG（环境、社会和治理）理念的绿色工业典范，有助于获得政府、小区和金融机构的广泛支持，并为未来可能到来的碳税、碳交易做好充分准备。

五、全新技术路径流程图



六、合作与展望

加拿大蒂斯代尔地区的高铝燧石是一座潜力巨大的“城市矿山”。Saskatchewan Process 为其开发提供了化学原理基础，而智能三环窑活化煅烧系统则为其插上了实现商业化、绿色化、高值化的翅膀。我们提出的“Saskatchewan-和宁顺”深度融合技术路径，是真正意义上的强强联合，它系统性地解决了传统工艺的所有核心痛点，构建了一条投资更省、成本更低、价值更高、环境更优的全新产业链。

这不仅仅是一项技术的输出与合作，更是一个产业生态的共同构建与双赢。我们相信，凭借贵方对本地资源和市场的深刻理解，以及我们在颠覆性热工装备和工艺集成方面的核心技术优势，双方的深度合作必将在蒂斯代尔打造一个全球非铝土矿提铝领域的技术标杆和商业典范。

中国山东和宁顺窑业股份有限公司对此合作充满期待，并提议双方组建联合技术团队，基于本方案进行更详细的可行性研究、物料测试与经济模型测算。我们愿以最开放的态度，携手加拿大合作伙伴，共同将这一宏伟蓝图变为现实。

中国山东和宁顺窑业股份有限公司

2026 年 1 月 1 日