

智能三环窑煅烧煤矸石在氧化铝、低碳水泥和高端耐火材料产业中的创新与应用

一、煤矸石产生的背景、现状与政策支持

煤矸石是煤层形成过程中伴生的低热值岩石，是煤矿开采和洗选过程中产生的主要固体废弃物。作为我国煤炭工业链中不可避免的副产品，煤矸石的产生与处置已成为国家亟待解决的环境难题和资源利用挑战。

1.1 产生背景与现状

中国作为全球最大的煤炭开采国，煤矸石产量同样位居世界首位。在典型的含煤沉积岩层中，煤矸石（夹矸层）占总岩层体积的 5%-20%。在煤炭开采过程中分离出的煤矸石约占 10%-15%，洗煤厂进一步分离原煤中的矸石占比为 10%-20%。目前我国煤矸石历史堆存量超过 85 亿吨，每年新增煤矸石约 7-8 亿吨，其中，山西、陕西、内蒙古、新疆、贵州、山东等煤炭资源丰富地区堆存量尤其巨大，资源化利用率不足 60%，且处置多以填埋和堆放为主。

长期大量堆积的煤矸石不仅占用大量土地资源，还会造成环境污染。煤矸石堆场的自燃现象和重金属渗滤液对周边土壤、水源和空气造成严重污染。然而，煤矸石又富含硅、铝等有价值的元素，既是环境负担，也是潜在的宝贵资源。如何将这种“废弃物”转化为“资源”，实现煤矸石从“以堆为主”向“以用为主”的转变，是当前我国固废处理领域的重大课题。

1.2 政策支持

1996 年 4 月国家颁布的《中华人民共和国固体废物污染环境防治法》及其配套文件要求加快推进固废资源化利用。2019 年 2 月，国家发展改革委、工信部又印发《关于推进大宗固体废弃物综合利用产业集聚发展的通知》，在重点

任务中明确：“以尾矿（共伴生矿）、煤矸石、粉煤灰、冶金渣（赤泥）、化工渣（工业副产石膏）、工业废弃料（建筑垃圾）、农林废弃物及其他类大宗固体废弃物为重点，选择废弃物产生量大且相对集中、具备资源综合利用基础、产业创新能力强、产品市场前景好、规模带动效益明显的地区，通过政策协同、机制创新和项目牵引等综合措施，开发和推广一批大宗固体废弃物综合利用先进技术、装备及高附加值产品。

2021 年 2 月，国家发改委、工信部等十部门联合印发《关于加快推动大宗固体废物综合利用的指导意见》，进一步明确将尾矿、煤矸石、粉煤灰、红泥等列为重点发展对象，提出要通过政策引导和技术攻关，建设废物综合利用产业集群，使煤矸石煅烧得到规模化、高值化应用。

2024 年 5 月国务院印发的《2024~2025 年节能降碳行动方案》强调控制化石能源消费，完善碳排放强度调控，明确要扩大全国碳排放权交易市场覆盖范围，逐步推行免费和有偿相结合的碳配额分配方式。这一系列“双碳”政策和循环经济政策，为煤矸石活化煅烧技术提供了有力的支持。在此政策背景下，政府通过财政补贴、技术示范和用能权交易等多种方式，激励企业参与煤矸石综合利用。煤矸石作为大宗固废，目前尚无成熟的规模化、高值化处置利用技术与配套设备，为鼓励社会资本投入，国家出台了大量资金补贴支持力度，形成了“政府补贴+碳收益+产品利润”的经济模式。

在“双碳”背景、固废利用和节能减排等国家战略驱动下，煤矸石的高值化利用既弥补我国相关能源和资源的不足，实现其历史堆量的减少，也助力“双碳”目标的实现，符合国家宏观产业政策，对于我国建成资源节约型社会具有深远意义。

二、智能三环窑的技术原理与工艺创新

2.1 技术原理

智能三环窑是由山东和宁顺窑业股份有限公司技术团队在深耕内蒙古煤矸石市场十八年，探索、积累、研究、设计出符合煤矸石规模化活化煅烧且具有独立知识产权的大型专利设备。它通过**热力学重构、污染控制突破和多元废物**

协同处置三大核心创新，实现了煤矸石的高效活化煅烧和高值化转化，开辟了煤矸石资源高效利用的新途径。

2.2 工艺创新

智能三环窑的核心创新体现在梯度精准温控和多级多孔富氧燃烧技术上，针对煤矸石的综合利用量身定做设计出一整套“**梯度烧结——低温活化焙烧**”方案，可以通过调节不同的煅烧温度和保温时间，实现了既可以低温活化焙烧，又可以高温结晶煅烧，再结合化学方法进行成分提纯，将块状煤矸石的煅烧效能提升至行业新高度。以实现煤矸石的高值化利用。其工艺创新主要体现在以下几个方面：

2.2.1 热力学重构与能效革命

梯度预热与余热循环：在窑首设有双重余热回收系统，利用煅烧尾气和产品冷却释放的双重余热循环系统对进料进行预热，比较传统煅烧窑炉（隧道窑、回转窑、竖窑）能耗降低 35-55%。

富氧气固两相煅烧：窑炉在燃烧阶段通过气固两相的**对流传导强化技术+富氧燃烧技术**，把物料**低温活化焙烧+高温结晶煅烧**的温度精准地控制在 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 的温差范围内，实现煤矸石“脱水、脱羟、脱碳”过程的温度精准控制，确保煤矸石“黑变白”的同时极大地激发其化学活性，使煤矸石热值利用率从传统窑炉的 48%跃升至 78%。

逆流冷却与高效换热：在产品冷却段采用逆流式余热回收装置、顺流式燃烧排烟和高效旋转烟气换热器，可实现 90%的热量回收，进一步降低能耗。同时，高富氧燃烧使得烟气中氮氧化物排放减少约 35%，环保压力显著降低。

2.2.2 污染控制技术矩阵

智能三环窑构建了全流程污染控制体系。在煅烧初期采用湿法活化协同脱硫技术，可将煤矸石中的硫固化率提高到 92%，使出口烟气 SO_2 浓度稳定在 $35\text{mg}/\text{m}^3$ 以下； $1250\text{--}1350^{\circ}\text{C}$ 高温段将重金属包裹固化成玻璃体结构，Pb、Cd 等的浸出毒性降低 2 个数量级；高效除尘系统（静电+纳米纤维袋滤）使粉尘排放降至 $8\text{mg}/\text{m}^3$ ，这些技术使得三环窑煅烧煤矸石过程各类污染物排放指标均显著优于国家标准。

2.2.3 多元固废协同处置能力

除了煤矸石外，智能三环窑也可协同处置矿渣、尾矿等其他工业固废。不同固废在窑内产生的废水、废气、废渣可互为原料和助燃材料，实现循环利用，大幅降低原料采购成本和生产成本。通过将煅烧后的产品（氧化铝、铝酸盐熟料、耐材原料等）与发电厂、化工厂等行业串联，还可构建一个热、电、材、环相结合的闭环产业园区，实现超低排放的绿色示范。

综上，智能三环窑通过热力学重构、污染控制突破和多元废物协同处置的工艺创新，实现了煤矸石的深度活化煅烧，其“低温活化+高温结晶”的双段梯度焙烧模式，使煤矸石中的高岭土组分充分转化成具有高活性的氧化铝硅酸钙熟料，为后续产业链应用打下基础。同时，余热循环和富氧燃烧显著提升了能效和环保性能，为传统高能耗、低效率的工艺提供了革命性改进。

三、煅烧煤矸石在制备氧化铝产业中的具体应用

3.1 工艺流程

煤矸石中富含高岭土成分，是制备氧化铝的潜在优质原料。智能三环窑煅烧煤矸石制取氧化铝的工艺流程主要包括以下步骤：

1. **低温活化煅烧：**将块状的煤矸石进入智能三环窑进行 700–850℃ 的低温活化焙烧，使煤矸石中的高岭土组分发生脱水、脱羟基反应，转化为活性较高的偏高岭土（偏高铝）熟料；
2. **精准筛选分级：**对活化煅烧后的煤矸石熟料进行精准筛选分级，选取其中铝含量较高的部分；
3. **化学脱硅提纯：**采用酸碱协同处理技术或其他化学方法，对筛选后的高铝熟料进行脱硅处理，进一步提高铝硅比；
4. **拜耳法提取氧化铝：**将脱硅处理后的高铝熟料作为拜耳法生产氧化铝的替代原料，通过碱浸、分离、沉淀、煅烧等工序，最终得到高纯度的氧化铝产品。

煤矸石富含高岭土成分，三环窑焙烧后形成富铝氧化物混合熟料以偏高岭土相为主，其中氧化铝和二氧化硅的不定形态含量超过 95%，再分级筛选结合

化学方法提纯，获取活性度非常高的偏高岭土熟料，是优质且需求量巨大的基础工业原料。

3.2 技术优势

智能三环窑针对大宗工业固废煤矸石进行“通吃”煅烧活化，然后通过精准筛选，把选取的高铝熟料进行化学脱硅提纯，实现降铁、降硅、铝硅比优化为核心的技术目的，生产出铝硅比适中的高铝成分原料，用来取代天然优质铝矾土矿石原料。这种高活性熟料可直接满足氧化铝厂对高氧化铝原料的需求，配合后续的拜耳法生产氢氧化铝+氧化铝，拓宽了氧化铝原料的来源渠道，降低了原料成本，革新了传统氧化铝生产技术路线。

与传统铝矾土相比，煤矸石高铝熟料具有显著技术优势和质量优势。通过智能三环窑的低温活化煅烧，煤矸石中的高岭土矿物晶体结构被高效破坏，形成高化学活性的无定形态氧化铝和二氧化硅，在后续拜耳法提取过程中，反应活性更活跃、提取效率更高。经过化学脱硅处理后的煤矸石熟料，其铝硅比可达到制备氧化铝的要求，杂质含量低，有利于提升终端产品氧化铝的品质。智能三环窑煅烧的煤矸石熟料可直接适配现有拜耳法生产线，无需大幅改造原有设备和工艺流程，实现平滑过渡。此外，大量利用煤矸石中的铝资源，减少对天然铝矾土矿的开采和消耗，延长优质矿产资源的使用寿命。

3.3 性能比较

与传统铝矾土相比，智能三环窑煅烧的煤矸石高铝熟料展现出显著的性能优势。经过煅烧和化学提纯后，优质煤矸石中的氧化铝含量可达 75%-95%且纯度高，大幅提高了熟料铝含量水平，铝硅比（A/S）远远大于 7.2。

煤矸石熟料中的氧化铝和二氧化硅以高活性的无定形态存在，其化学反应活性超过天然铝矾土，能够在较低温度和更短时间内完成碱浸反应，从而有效节约能源和时间成本。

通过三环窑的“三脱”工艺，煤矸石熟料中的硫、碳等杂质得到有效控制和排除，确保这些杂质不会对氧化铝产品质量产生负面影响。

此外，该工艺具备优异的适应性，能够处理来自不同地区、不同品质的煤矸石，经过低温活化煅烧和后续处理后，均可获得性能稳定的产品。这种增强的原料适应性显著降低了对单一来源铝矾土的依赖度。

3.4 成本分析

采用煅烧煤矸石取代传统铝矾土制备氧化铝是一项具有显著经济与环保优势的技术路线。不仅降低了原材料成本，还有利于固废资源化，符合环保要求。从成本角度分析，使用智能三环窑煅烧煤矸石制备氧化铝相比传统工艺具有显著经济优势。

煤矸石原料价格极低，在大型的煤矸石填埋场，需要收取 30-50 元/吨的排矸费，这个费用可以抵消运费和烧前拣选费；智能三环窑采用余热循环和富氧燃烧技术，煅烧能耗显著降低，每吨煤矸石煅烧能耗成本约为 60-80 元，仅占传统窑炉的 30%；加上人工电费设备折旧 120 元/吨；溶出制作高铝原料（铝硅比 ≥ 7.2 ）成本 200 元/吨；环保、财务费用等 60 元/吨；达到生产氧化铝的铝土矿要求的综合成本能够控制在 450-500 元/吨，比目前到港的几内亚进口铝矾土 105 美金（合人民币 760 元/吨）的价格少了 200-300 元/吨。

另外，溶出的副产品还可以制作单晶硅多晶硅、硅溶胶、白炭黑、微粉填料，每吨还可以有 300-500 元的收入；同时，在后期生产氢氧化铝过程中，省去了原料矿石煅烧工序，生产氧化铝还可以再节省煅烧成本 120-150 元/吨。

环保方面，智能三环窑自身实现超低排放，简化了尾气处理设施，环保处理投入较低。同时，处理煤矸石还可获得国家补贴和碳交易收益，进一步降低综合生产成本。此外，煤矸石经过筛选提取高铝成分后，剩余的高硅、高铁部分熟料可用于单晶硅的生产和 LC3 低碳水泥或其他建材产品的制造，实现全组分利用，提高整体经济效益。

智能三环窑煅烧煤矸石制备氧化铝的技术路线，不仅解决了煤矸石这一大宗固废的处置问题，还为氧化铝行业提供了一条低成本、环保、可持续的新路径，具有显著的经济效益和社会效益。

四、煅烧煤矸石在低碳水泥产业中的具体应用

4.1 工艺流程

智能三环窑煅烧煤矸石制备低碳水泥的工艺流程主要包括以下步骤：

1. **低温活化煅烧：**将煤矸石在智能三环窑中进行 700-850℃ 的低温活化煅烧，通过精准温控使煤矸石中的高岭土矿物发生脱水、脱羟基反应，转化为具有高火山灰活性的偏高岭土熟料；
2. **磨细混合：**将煅烧后的煤矸石熟料进行磨细处理，按照一定比例与石灰石粉、石膏等辅助材料混合均匀；
3. **熟料替代生产：**将煅烧煤矸石混合料作为低碳水泥熟料替代材料，与传统硅酸盐水泥熟料按照 50% 的比例混合，生产 LC3 低碳水泥；
4. **水泥成品制备：**将混合熟料进行最终研磨、包装，得到符合标准的 LC3 低碳水泥产品。

智能三环窑“梯度烧结——低温活化”焙烧煤矸石，通过不同的温度调节，活化煅烧，制备出低碳水泥熟料，为生产高标准 LC3 环保低碳水泥提供了充足的优质熟料。

4.2 技术优势

煅烧煤矸石在低碳水泥产业应用中具备显著的技术优势。首先，作为熟料替代材料，煅烧煤矸石可替代传统硅酸盐水泥熟料 50% 的添加量，大幅降低对高能耗、高碳排放传统熟料的依赖。其次，煅烧煤矸石的生产温度仅需 700-850℃，而传统水泥熟料需要 1450℃ 高温煅烧，这一能耗差异使得生产过程的碳排放显著降低。

此外，使用煅烧煤矸石熟料相对于传统硅酸盐水泥的生产，可以节省 50% 的石灰石和黏土资源，同时减少 40% 的熟料煅烧能耗，体现了明显的资源节约优势。更为重要的是，LC3 低碳水泥在耐酸碱盐、抗氯离子渗透、抗低温冻蚀、后期强度高、高抗裂与耐久性等方面，具有普通硅酸盐水泥不可比拟的优良性能，为建筑材料提供了更加可靠的质量保障。

4.3 性能比较

煅烧煤矸石生产的 LC3 低碳水泥与传统硅酸盐水泥相比具有显著优势。在碳排放方面，通过替代传统硅酸盐水泥熟料 50% 的加入量，LC3 低碳水泥可减少约 40% 的碳排放。若考虑原料处理、煅烧、运输等全生命周期，其碳排放总量比传统水泥生产减少 60%。

在强度性能上，用低铝高硅煤矸石制备的铝酸盐水泥，3 天和 28 天抗压强度分别达 34.7 和 54.4 MPa，完全符合 525 早强型高性能水泥的强度要求。同时，该水泥在延长建筑寿命、减少维护和重建的资源消耗方面展现出不可替代的优势，特别是在海工、地下工程等恶劣环境应用中表现更为突出。

煅烧煤矸石生产的 LC3 低碳水泥适应性强，可广泛应用于高铁、桥梁、港口、机场、军用设施等重要领域建设，已成为目前国际上首选的高品质特种水泥品种。

通过智能三环窑煅烧煤矸石制备的 LC3 低碳水泥，完全颠覆了传统的水泥熟料制作工艺、取代传统的硅酸盐水泥，为水泥行业的发展开辟了一条新的赛道。

4.4 成本分析

从成本角度分析，智能三环窑煅烧煤矸石生产 LC3 低碳水泥具有显著的经济优势。首先，煤矸石价格极低，相比传统水泥熟料所需的石灰石、粘土等原料成本大幅降低。其次，煅烧温度从传统的 1450℃ 降至 700-850℃，能耗降低约 45%，每吨产品能耗成本由传统的 128 元降至约 78 元，实现了显著的能源成本节约。

此外，相比于传统水泥生产，LC3 低碳水泥每吨减排约 0.4 吨 CO₂，企业可以每年获取大量的 CCER 指标，这些指标既可用于碳交易增加企业收入，也可以抵消企业碳排放配额缺口，为企业带来额外收益。同时，作为固废综合利用和低碳技术创新项目，该生产方式可获得政府补贴和优惠政策支持，进一步降低综合成本。

智能三环窑煅烧煤矸石熟料加入水泥中，可减少传统熟料用量和烧成能耗，综合成本大幅度降低。由此生产的 LC3 低碳水泥具有显著的成本优势，增强了企业抵御风险的能力，提升了市场核心竞争力。

特别值得一提的是，LC3 低碳水泥作为水泥行业实现碳中和的关键技术之一，已经在全球范围内受到广泛关注和推广。古巴是全球首个将 LC3 纳入国家标准的国家；欧盟通过修订水泥标准（EN 197-1），允许熟料含量降至 50%；美国材料与试验协会（ASTM）的 ASTM 595 标准也允许 LC3 的使用。智能三环窑的成功应用，为我国 LC3 低碳水泥技术的发展和国际输出提供了关键技术和设备支撑。

五、煅烧煤矸石在高端耐火材料产业中的具体应用

5.1 工艺流程

智能三环窑煅烧煤矸石制备高端耐火材料的工艺流程主要包括以下步骤：

- 低温活化煅烧：**将筛选后的煤矸石在智能三环窑中进行低温活化煅烧，通过精准温控激发煤矸石中高岭土矿物的活性；
- 精细分级筛选：**对煅烧后的熟料进行精细分级筛选，选取铝含量高、铁含量低的优质部分；
- 化学提纯处理：**采用化学方法对筛选后的熟料进行进一步提纯，去除有害杂质，提高氧化铝含量；
- 高温煅烧制备：**根据不同耐火材料的需求，将提纯后的熟料进行二次高温煅烧或电熔，制备焦宝石、莫来石等高端耐火原料；
- 成品加工制备：**将制备的耐火原料进行磨细、成型、烧结等工序，最终得到各类高端耐火材料产品。

5.2 技术优势

煅烧煤矸石在高端耐火材料产业应用具有多方面技术优势。煅烧煤矸石可替代天然焦宝石（高岭土）和铝矾土等传统耐火原料，有效拓宽了原料来源渠道，降低对自然资源的依赖和生产成本。经智能三环窑低温活化煅烧后的煤矸石熟料活性高，能更好地与其他原料结合，提高耐火材料的综合性能。通过智能三环窑的精准温控和筛选提纯工艺，可以稳定控制产品的化学成分和物理性能，确保耐火材料的品质稳定性。此外，根据不同耐火材料的需求，通过调整

煅烧温度、保温时间和后处理工艺，能制备不同品级、不同性能的耐火原料，实现定制化生产，拉长了产业链条，显著提升煤矸石的附加值。

5.3 性能比较

煅烧煤矸石制备的耐火材料原料与传统天然原料相比具有多方面的性能优势。经过处理的高品质煤矸石熟料中氧化铝含量可达 45% 以上，纯度高，完全达到优质焦宝石的质量标准。这种材料耐火度可达 1750℃ 以上，满足大多数工业炉窑的使用需求。煅烧煤矸石熟料由于其特殊的微观结构，热膨胀系数较低，热震稳定性优于天然焦宝石。此外，它还具有结构致密、遇水不分散、塑性指数低等特点，与天然焦宝石类似，是制造高铝砖和莫来石砖等高档耐火材料的优质替代原料。

通过对活化煅烧后的煤矸石进行分级筛选和化学提纯，再经高温焙烧和精细加工，即可制备出优质焦宝石熟料。这样处理既将煤矸石中的铝成分以高附加值形式锁定并供应给耐火材料厂，又减少了矿山开采对天然高岭土矿的消耗，实现了资源节约和固废循环利用。

5.4 成本分析

从成本角度分析，智能三环窑煅烧煤矸石制备高端耐火材料原料具有显著的经济优势。首先，煤矸石作为原料价格极低，而通过煅烧制成的焦宝石（煅烧高岭土）因原料成本和制取成本较低，在市场应用中优势明显。

其次，在煅烧工艺方面，智能三环窑采用余热循环和多级富氧燃烧技术，使煅烧能耗大幅降低，每吨产品能耗成本约为 38 元，这一数值显著低于传统窑炉的能耗水平。

在环保成本方面，智能三环窑的超低排放特性大大减少了环保处理投入，同时处理煤矸石还可获得政府补贴和碳交易收益，进一步降低了综合成本。

此外，煤矸石经过筛选提取高铝成分后，剩余部分可作为生产 LC3 低碳水泥或其他建材的优质原料，实现全组分利用，提高整体经济效益。

通过智能三环窑煅烧煤矸石替代传统的天然焦宝石，因其较低的原料和制取成本，使得煅烧煤矸石制备的高端耐火材料具有显著的市场竞争力。煅烧煤矸石制备的耐火材料原料不仅可以用于传统的粘土砖和高铝砖，还可以应用于

硅酸铝纤维棉、玻璃纤维布的生产，以及造纸、油漆涂料、化工、橡胶等众多需要微粉填料的工业领域，市场前景广阔。

六、智能三环窑煅烧煤矸石技术的创新与未来前景

6.1 技术创新性

智能三环窑煅烧煤矸石技术展现了多方面的创新突破。工艺技术上，该技术通过“梯度精准温控—多级多孔富氧燃烧”技术体系，实现了煤矸石的高效活化煅烧，突破了传统煅烧技术的效能瓶颈，根本性解决了规模化生产、成本高的难题。在设备结构方面，智能三环窑采用立体空间设计，充分利用热能梯度和物料流动特性，显著提高了设备的生产效率和能源利用率。

污染控制是该技术的另一创新亮点，其构建了全链条污染防控体系，实现了硫固化、重金属包裹和超低粉尘排放，为固废处理提供了环保示范。此外，该技术还实现了多元协同创新，能够协同处置煤矸石、尾矿、矿渣等多种固废，促进废物之间的互补利用，提高了资源化处理的综合效益。

智能三环窑通过热力学重构、污染控制突破和多元废物协同处置的工艺创新，实现了煤矸石的深度活化煅烧。其“低温活化+高温结晶”的双段梯度焙烧模式，使煤矸石中的高岭土组分充分转化成具有高活性的氧化铝硅酸钙熟料，为传统行业的绿色转型提供了技术支撑。

6.2 行业变革潜力

以固废煤矸石为原料、智能三环窑为载体，“吃干榨净”式的规模化煅烧、处置技术和模式有望带来多个传统行业的深刻变革。该技术不仅为传统氧化铝生产提供了新的原料来源渠道，有助于降低对进口铝矾土的依赖，提高行业的资源安全性，还可推动水泥行业从“高碳工艺”向“低碳制造”转型升级，通过采用煅烧煤矸石作为低碳水泥熟料，助力行业实现“双碳”目标；同时，煅烧煤矸石能够替代天然焦宝石和铝矾土，降低耐火材料行业对自然资源的依赖，推动该行业向更高质量、更低成本方向发展。智能三环窑煅烧煤矸石技术还为

煤矸石等大宗固废处理提供了高值化利用路径，促进固废处理行业从简单填埋向资源化利用的根本性转变。

6.3 经济社会效益

智能三环窑煅烧煤矸石技术的广泛应用将带来显著的经济和社会效益。从经济角度看，该技术能够降低原料成本、减少能源消耗，同时企业可获取政府补贴和碳交易收益，形成“政府补贴+碳收益+产品利润”的新型经济模式，有效提高企业盈利能力。

环境效益方面，每处理 1 万吨煤矸石，可减少二氧化碳排放约 260 吨，二氧化硫约 120 吨，氮氧化物约 180 吨，粉尘约 290 吨，对改善环境质量具有明显作用。

此技术还能盘活煤矸石这一固体废弃物资源，减少对天然资源的开采，延长矿产资源寿命，从而推动资源节约型社会建设。同时，其社会价值体现在创造新的就业机会，促进相关产业链发展，助力地方经济转型升级，尤其对煤炭资源丰富但面临结构转型压力较大的地区意义重大。

6.4 国际合作前景

目前，世界各国同样面临着煤矸石堆存、处置带来的污染和困惑，缺乏合理的技术路径和规模化处置的专业设备。智能三环窑的诞生从根本上解决了这一世界性难题。水泥是基础设施建设的关键材料，在全球范围内有着广泛的应用和重要的经济作用，水泥产业遍布世界各地，具有高度分散性的特点，高耗能、高污染却一直是困惑行业发展的难题。LC3 低碳水泥作为水泥行业实现碳中和的关键技术之一，全球和中国的研究与推广均取得显著进展，但仍面临技术优化和规模化应用的挑战。智能三环窑煅烧处置煤矸石和矿渣尾矿技术的成功应用，从根本上解决了 LC3 水泥所面临的低碳原料替代、低温活化煅烧与品型稳定的技术壁垒和 LC3 水泥规模化量产三个难题。

智能三环窑专利设备的落地，中国必将成为固废处置资源化利用和专业设备技术输出的重要力量，助力全球“双碳”目标的实现。未来，随着全球环保标准的不断提高和“双碳”目标的共同推进，智能三环窑做为固废处置资源化利用和技术推广应用的核心设备，有望在国际范围内获得广泛应用。通过技术输

出、设备出口和工程服务，加强国际合作与区域资源整合将是固废资源化利用全球化、规模化应用的关键。可以帮助其他煤炭资源丰富国家解决类似的固废处理问题，为全球环保事业和资源可持续利用作出贡献。

七、结论

智能三环窑煅烧煤矸石技术是一项具有重大创新意义的专利技术。它以煤矸石低温活化煅烧为技术核心，通过热能梯度利用、多级富氧燃烧与温差智能控制技术，突破了煤矸石综合利用规模化量产和高附加值“吃干榨净”关键技术瓶颈，实现了煤矸石从“黑色固废”向高附加值产品的彻底转变，高废高值、低碳制造。其技术优势包括节能降耗（热效率由 50%提升至 78%）、高比例固废替代（烧成熟料中煤矸石占比可超过 50%）、超低排放（标准远优于国标）、显著的经济效益（耗能成本降低 30%以上、投资回收期缩短至 3 年左右）等。

在氧化铝制备方面，智能三环窑煅烧煤矸石可取代铝矾土作为拜耳法生产的替代原料，革新了传统氧化铝生产技术路线。经济效益显著。以平均每吨铝矾土 700-1000 元计算，每吨煅烧煤矸石高铝熟料可节省原料成本约 200-300 元，副产品收益 300-500 元/吨，节省煅烧费用 120-150 元/吨，三项合计节省的成本与进口原料成本相当，经济效益显著。

在低碳水泥方面，煅烧煤矸石作为 LC3 低碳水泥的关键组分，可替代传统硅酸盐水泥熟料 50%的添加量，减少 40%的碳排放。不仅降低了生产成本，还显著提升了水泥品质，在耐酸碱盐、抗氯离子渗透、抗低温冻蚀等方面表现优异，是高铁、桥梁、港口等重要工程的首选产品。

在高端耐火材料方面，煅烧煤矸石经过精细加工可替代天然焦宝石，用于制备高铝耐火材料，每吨可节省原料成本约 200-300 元。同时，还可用于硅酸铝纤维棉、玻璃纤维布等多种高值产品的生产，市场前景广阔。

智能三环窑的研发，为氧化铝、传统水泥、耐火材料行业的“双碳”转型提供了持续可行的发展路径。未来，应加强政策扶持和标准建设，加快研发迭代与产业化的深度融合，使智能三环窑成为引领固废利用和绿色制造的典范，为行业高质量发展提供坚实技术支撑。

随着技术标准的完善和绿色金融工具的引入，智能三环窑将推动形成万亿级固废经济新业态，为全球工业低碳转型提供中国方案。特别是在“双碳”背景下，智能三环窑技术的应用价值将会更加凸显，为社会和企业带来环境效益与经济效益的双赢。

山东和宁顺窑业股份有限公司