

智能三环窑煅烧菱镁矿、煤矸石

制取耐火材料技术分析

山东和宁顺窑业股份有限公司研发的智能三环窑在耐火材料关键原料——菱镁矿和煤矸石煅烧领域的创新应用具有行业领先的技术优势。面对传统窑炉产能低下、能耗高、污染严重及自动化程度低的行业困境，智能三环窑作为一种集高效节能、智能控制与环保于一体的新型数字化窑炉，为耐火材料产业的技术升级提供了革命性的解决方案。

在轻烧镁生产方面，该窑炉通过其独特的结构设计、余热回收系统和机器人的智能应用等革新措施，实现了轻烧镁规模化生产的目标，产品灼减率低于1%，大幅降低了能耗与人力成本。在煤矸石高值化利用方面，智能三环窑的核心技术在于“活化焙烧”，通过精准的温控与煅烧过程，将煤矸石中的硅铝组分活性高效激发，使其利用率超过95%，为后续提取高纯氧化铝、纳米硅溶胶等高端耐火材料原料奠定了基础，实现了对工业固废“吃干榨净”式的高值化利用。

智能三环窑的核心技术原理、工艺流程、在两种不同物料煅烧应用中的具体实践、经济与社会效益充分展现了智能三环窑技术的先进性。事实表明，智能三环窑不仅是传统窑炉的简单替代，更是推动耐火材料行业向“新质生产力”转型，实现绿色、低碳、智能化发展的关键装备，具有广阔的市场推广前景和重大的产业示范意义。

1. 引言

1.1. 行业背景与挑战

耐火材料是高温工业不可或缺的基础材料，其性能直接影响着钢铁、有色、建材、化工等下游产业的发展。菱镁矿和煤矸石是生产镁质耐火材料和铝硅质耐火材料的重要原料。然而，长期以来，这些原料的煅烧加工环节普遍面临严峻挑战。

目前，辽宁镁系耐火材料集中的产业群，其拥有的上千座轻烧镁粉竖窑均为传统老式土窑，存在生产工艺简单、产量低、能耗高、作业环境差、用人多、机械化自动化程度非常低等诸多弊病，已完全不适应当前国家对节能环保的严格要求。这种粗放的生产方式不仅导致了宝贵矿产资源的浪费，也对生态环境造成了巨大压力。

同样，煤矸石作为煤炭开采过程中的主要固体废弃物，其大规模堆存不仅占用土地，还可能引发自燃、污染水源和大气。如何将煤矸石从“工业包袱”转变为高附加值的资源，是固废综合利用领域的重要课题。

1.2. 智能三环窑的技术突破

山东和宁顺窑业股份有限公司为代表的技术企业，致力于研发新型高效的窑炉技术。其推出的 HNS 系列智能三环窑，是一种结构新颖、能耗低、产量大、智能化数字控制、操作简便、节能环保的新型数字化智能窑炉，是目前国内煅烧行业中的先进技术代表。

该窑炉的出现，彻底改变了镁系耐火材料传统土窑的设备落后的状况，通过技术革新，实现“把原料‘吃干榨净’，提升盈利空间，增加企业收入”的目标。山东宁顺窑业股份有限公司提供的智能三环窑技术方案，分别从**轻烧镁粉生产**和**煤矸石高值化利用**两个核心应用场景，对智能三环窑的技术原理、工艺特征、应用成效及其在耐火材料行业中的深远影响进行全面、详尽的阐述。

2. 智能三环窑核心技术解析

智能三环窑的卓越性能源于其在结构、热工、控制等方面的系统性创新。它摒弃了传统窑炉的粗放设计，融入了精细化的热量管理和高度智能化的操作理念。

2.1. 总体设计与工艺特征

智能三环窑的工艺核心在于**并流顺烧与逆流焙烧相结合**的煅烧方式。窑炉主体沿垂直方向自上而下分为**预热带、烧成带、冷却带**三部分。物料在窑内自上而下缓慢移动，而热气流则在窑内形成复杂的循环路径，确保了不同阶段的热工需求得到精准满足。

结构组成：窑炉主体上部为圆柱形的预热带，中部为矩形箱体状的烧成带，下部为椭圆形柱状的熟料存储冷却带。以 HNS-5300S 型号为例，其有效高度达 66 米，筒体最大内径 11.4 米。这种设计不仅优化了物料在窑内的运动轨迹，也为各功能区的强化提供了空间。

热工原理：该煅烧方式有效解决了传统反射土窑只能煅烧大块料的弊端，能够均匀加热 25mm 至 200mm 范围内的多种粒度矿石，并延长其煅烧时间，确保矿石分解彻底，稳定最终产品（如方镁石）的晶相保有量。

2.2. 关键技术革新措施

智能三环窑的领先性体现在以下几个关键的革新设计中：

2.2.1. 增设冷却带的闷烧分解换热装置 这是该窑炉的一大技术亮点。在窑体下部的冷却带设置了管式换热装置，通过抽热风机将熟料的余热抽出，形成高温热空气，这部分热空气随即作为烧成带下部烧嘴的二次助燃风，实现了高效的余热回收。更重要的是，出窑前的轻烧氧化镁粉料在此区域停留长达 **24-36 小时**，实现了“**闷烧兼均化**”的特殊工艺效果。在这一过程中，物料中尚未完

全分解的碳酸镁（ MgCO_3 ）得以继续分解，从而确保最终产品的灼减率稳定降至1%以下，从根本上提升了产品质量。同时，窑底部通过高压鼓风机强制鼓入干燥冷却风（或低温氮气），对换热管道进行冷却，避免了冷风直接冲击烧成带，保证了窑炉运行的连续性和稳定性。

2.2.2. 窑炉墙体的节能保温设计 窑炉墙体采用精细化的多层砌筑结构，由内向外依次为工作衬、隔热层、承重层。根据预热、烧成、冷却三带不同的工作温度，相应采用不同材质和厚度的耐火及保温材料，有效控制了窑炉向外的热量散失，显著提高了窑炉整体热效率，节能降耗效果突出。

2.2.3. 窑体容积的优化与扩大 为了最大化热能利用和生产效率，窑炉在垂直空间上进行了优化设计：

1. **顶部料仓兼预热器：**窑炉顶部设计为大型料仓兼预热器，可储存窑炉一天的物料量。这极大地增大了物料装载量，使得窑炉排出的烟气余热能够被充分利用，对入窑前的矿石进行预热，从而提高窑的利用系数，降低单位产品能耗。
2. **底部冷却带扩容：**窑炉底部的冷却带仓储量相比传统设计扩大了11倍。巨大的仓储空间不仅延长了物料的冷却和“闷烧”时间，更极大地扩展了换热面积，从而提高了余热利用系数，进一步降低了单位产品能耗。

2.2.4. 新型热煤气烧嘴与燃烧系统 窑炉烧成带配备了两排新型高速煤气烧嘴，采用热风助燃，一组助燃风来自冷却段回收的热空气，另一组来自独立的热风炉。煤气在入窑时与高温助燃风充分混合，促进了完全燃烧，保证了火焰具有足够的长度和穿透力。这种设计充分体现了热煤气的长焰燃烧特点，使物料被火焰均匀包裹煅烧，有效减少了“生烧”现象的产生，为后续工序（如压球）的半成品合格率打下坚实基础。

2.2.5. 智能化机器人卸料装置 这是实现窑炉智能化、自动化的核心。传统的人工卸料方式粉尘大、热量损失严重、劳动强度高且效率低下。智能三环窑采用的机器人卸料系统彻底改变了这一局面：

密封环保生产：卸料区域采用强制密封保温装置，实现了密闭卸料，从源头上杜绝了粉尘飞扬，减少了窑内热量散失，改善了操作环境。

24小时连续作业：携带智能化摇臂钻的卸料机器人可以24小时循环卸料，两侧同时操作，效率极高。

智能精准操作：机器人工作时，其前端的耐高温保护罩会与窑体捣料口精确扣合，并启动密封气幕，形成正压保护，防止冷空气侵入。机器人通过远红外及埋入式测温装置感知物料的煅烧状态，随时调整掏料钻杆的上下左右摆动、捣击力度和方向，确保卸下的成品料均达到煅烧标准，最大限度地控制了产品质量。

效率巨大提升：经过初步测算，与人工卸料相比，智能机器人卸料可将产量提高**三到五倍以上**，同时节省人工**80%**。

2.2.6. 高度自动化与数字化控制 整个窑炉系统采用数字化智能控制，实现了从配料、上料到卸料的全流程自动化。窑炉的关键部位（如排烟、预热、加热、冷却区）密集安装了温度、压力、流量、含氧量等各类传感器，做到了“四测”及时准确。所有数据实时传输至中控室，系统自动调控，最终达到“物料煅烧精准化，产品质量数字化，人员设备安全化，现场环境清洁化”的“四化”管理目标。

3. 在轻烧镁生产中的应用

轻烧镁（CCM），即苛性煅烧氧化镁，是生产高纯镁砂、中档镁砂、镁质凝胶材料等多种耐火制品的基础原料。智能三环窑在轻烧镁生产中的应用，是对传统工艺的一次颠覆性升级。

3.1. 项目背景与目标

该应用以辽宁某集团的老旧土窑技术升级改造项目为蓝本。集团决定拆除12座旧窑，在原址上新建一座日产380吨的HNS-5300S型智能三环窑，旨在置换环保指标、节省土地、节约能源、减少操作工人、提高生产效率和产品质量。

3.2. 生产工艺流程

- 原料准备：**将菱镁矿块料按粒度分级，通常分为25-50mm、50-100mm、100-200mm三种规格，建议分别入窑焙烧以达到最佳效果。小于25mm的碎矿可另作他用。
- 上料：**通过自动配料系统精准配比后，由“上料小车”将矿石输送至窑顶，再经布料器均匀加入预热器内。
- 煅烧：**物料在窑内依次通过预热带、烧成带和冷却带。在烧成带，物料在高温下（通常在700-1000°C）停留6-8小时，确保 $MgCO_3$ 充分分解为 MgO 和 CO_2 。
- 卸料：**烧成的轻烧镁粉经由智能机器人插入焖料层，经过充分均化和冷却后，由窑底的螺锥旋转出灰机排出。
- 成品：**排出的轻烧镁粉温度约为**环境温度+65°C**，可直接通过皮带输送至料仓或压球车间，全过程封闭，环境清洁。

3.3. 技术优势与产品质量

应用智能三环窑生产轻烧镁，其优势是全方位的：

产量巨大提升：单窑日产量可达**380吨±7%**，比传统土窑提高了**十倍以上**。

产品质量卓越：得益于均匀受热、长煅烧时间以及冷却带的“闷烧均化”效应，产品质量堪比悬浮炉、沸腾炉、套筒窑、麦尔兹窑等国际先进窑型。其**残余灼减（烧碱）可以稳定在 1% 以下**，从根本上解决了传统土窑产品质量不稳定的问题。

高附加值：高质量的轻烧镁粉具有优良的烧结活性和高成球率，是制备高纯镁砂和中档镁砂的理想原料，显著提升了产品的盈利空间。

综合效益显著：与麦尔兹等窑型相比，智能三环窑在保证高质量的同时，具有投资性价比大、占地少、产能高的特点，综合经济效益突出。

4. 在煤矸石高值化利用中的应用

如果说在轻烧镁生产中的应用是“提质增效”，那么在煤矸石处理上的应用则是“变废为宝”的典范。智能三环窑在此处扮演的角色不再仅仅是煅烧炉，而是一个**化学反应活化器**。

4.1. 项目背景与创新理念

该应用以山东和宁顺窑业拟在内蒙古建设的年处置 100 万吨煤矸石生产氧化铝和硅溶胶项目为蓝本。其核心理念是彻底抛弃将煤矸石作为低级燃料或填料的传统路径，采用**独立知识产权的智能三环窑煅烧技术，结合盐酸高效浸出工艺体系**，对煤矸石进行“吃干榨净”式的全组分高值化利用。

4.2. “活化焙烧”的核心工艺

煤矸石的主要化学成分是 Al_2O_3 和 SiO_2 ，多以高岭石等稳定结晶形态存在，直接酸浸反应活性极低。智能三环窑在此处的关键作用是进行“**活化焙烧**”。

在窑内精确控制的温度和气氛下，煤矸石中的高岭石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ）发生脱羟基反应，其晶格结构被破坏，转变为无定形的、具有高度化学活性的偏高岭石（ $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）。这一步是整个工艺链的龙头，通过活化焙烧，可以实现**煤矸石中硅铝组分 >95% 的高效利用**。

4.3. 全产业链工艺流程

以活化焙烧为起点，形成了一条完整的新材料产业链：

1. **原料预处理：**块状煤矸石 (30 - 300mm) 经精准拣选后进入智能三环窑。
2. **活化焙烧：**在 $\Phi 6.2 \times 56\text{m}$ 的智能三环窑中进行活化处理，得到煅烧熟料。
3. **二次处理：**熟料经破碎、筛分、二次拣选和磨粉系统处理成细粉。

4. **酸浸脱硅：**粉料进入盐酸梯级酸浸系统，利用其高活性，其中的氧化铝被盐酸浸出形成氯化铝溶液。
5. **固液分离：**分离后得到含铝液和不溶的硅渣。
6. **产品制备：**
 - **铝线：**铝液经铝粉还原、沉淀等工序，最终制成**氢氧化铝产品**（年产 32 万吨， $\text{Al}_2\text{O}_3 \geq 65\%$ ，达到冶金级标准）。
 - **硅线：**硅渣经碱溶提硅、纳米胶体稳定化等步骤，制成**硅溶胶粉体产品**（年产 45 万吨，粒径 $30 \pm 5\text{nm}$ ，比表面积 $>500\text{m}^2/\text{g}$ ，技术指标优良）。
7. **废渣利用：**最终的残渣用于配制**低碳水泥熟料**（年产 8 万吨），实现固废零排放。

4.4. 对耐火材料行业的深远意义

这一应用模式对于耐火材料行业具有战略性意义。它开辟了一条不依赖于高品位天然矿产（如铝土矿）来生产高端耐火原料的新路径。

提供高品质合成原料：项目产出的高纯氢氧化铝和高活性硅溶胶，是合成莫来石（ $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ ）、堇青石等高级合成耐火原料的理想选择。这些合成材料具有纯度高、成分稳定、高温性能优异等特点。

降低原料成本与对外依存度：以低成本的工业固废煤矸石为起点，生产出可替代甚至优于天然矿物原料的产品，有助于降低我国耐火材料行业对优质铝土矿等资源的依赖，保障产业链安全。

推动绿色循环发展：该模式完美契合“双碳”目标和循环经济理念，将固废处理与新材料制造相结合，社会效益和环境效益极为显著。项目年消纳煤矸石 100 万吨，可减少 CO_2 排放 85 万吨，节约标煤 28 万吨。

5. 综合对比分析与市场前景

5.1. 与各类窑炉的比较优势

相较于传统土窑：智能三环窑在产量、质量、能耗、环保、自动化程度上实现了“质的飞跃”，是彻底的更新换代。

相较于其他先进窑炉（悬浮炉、麦尔兹窑等）：智能三环窑在保证产品质量相当的前提下，凸显出**产品质量好（特别是成球率高）、高纯球烧结性优、投资性价比大、占地少、产能高等综合优势**，为投资者提供了更具经济性的选择。

5.2. 市场定位与前景

智能三环窑的市场定位是面向对产品质量、环保标准和生产效率有高要求的企业，旨在解决行业痛点，推动产业升级。

在镁质材料领域：随着下游行业对高品质耐火材料需求的增加，高质量、低成本的轻烧镁粉市场空间广阔。智能三环窑是生产这类产品的理想设备。

在固废利用领域：煤矸石“活化焙烧”技术的成功，为该窑炉开辟了一个全新的、潜力巨大的市场。其技术示范效应显著，单体项目年处置煤矸石能力可扩展至 2000 万吨，有望在国内固废高值化利用领域得到大规模推广。

产业链延伸价值：项目产出的高端硅溶胶可用于半导体、人工智能机器人等前沿产业；氢氧化铝可就地发展电解铝；低碳水泥则顺应了未来建筑业的绿色趋势。这种强大的产业链延伸能力，使其不仅仅是一个设备，而是一个能够催生 70 亿级产业集群的核心技术。

凭借其技术壁垒高、原料成本低、产品竞争力强的特点，采用智能三环窑的项目有望快速占领高端市场，成为行业的技术引领者。

6. 结论

山东和宁顺窑业股份有限公司研发的智能三环窑，通过一系列深刻的技术革新，成功地解决了传统煅烧工业长期存在的能耗、环保、效率与质量等多重难题。

- 技术先进性：**该窑炉融合了创新的热工设计、高效的余热回收、颠覆性的机器人卸料系统和全面的数字化智能控制，代表了当前工业窑炉领域的前沿水平。
- 应用广泛性与深刻性：**在轻烧镁生产中，它实现了传统产业的“提质增效”和现代化转型；在煤矸石处理中，它通过“活化焙烧”这一关键步骤，开创了固废资源化利用的全新范式，将环境包袱转变为高价值的新材料来源。
- 经济与社会价值：**无论是从降低生产成本、提高企业盈利，还是从消纳工业固废、减少碳排放、推动循环经济发展的角度，智能三环窑都展现出巨大的经济效益和社会效益。

综上所述，智能三环窑不仅是一款高性能的工业装备，更是践行“新质生产力”理念、推动耐火材料及相关产业实现高质量、可持续发展的强大技术引擎。其在菱镁矿和煤矸石煅烧领域的成功应用，充分证明了其技术的成熟可靠与广阔的推广价值，值得在行业内进行深入论证和积极实施。