

附件

国家工业资源综合利用先进适用工艺技术设备目录 (2025年版) 供需对接指南之四 钢铁冶金渣综合利用工艺技术设备

(一) 冶金渣协同开发低碳多元胶凝材料的技术与应用

1. 适用范围

冶金固废综合利用。

2. 技术原理及工艺

技术原理：低碳多元胶凝材料通过碱性激发、硫酸盐激发或复合激发，激活固废中的活性硅铝相和钙相，形成水化硅酸钙（C-S-H）凝胶、钙矾石（AFt）或低聚物凝胶等胶凝产物。

技术工艺：低碳多元胶凝材料是以工业固体废弃物为主要原料，通过磁选、烘干、粉磨、风选等多道精细工艺制备而成的具有胶凝性能的材料。磁选能去除其中的磁性杂质，烘干使固废达到合适的含水量，粉磨让其粒度细化，风选后进一步筛选出符合要求的颗粒。

3. 技术指标

(1) 掺比（不含再制造）：

低碳多元胶凝材料的掺比设计是实现其性能优化的核心，需综合考虑固废原料的化学组成、活性特性及激发剂协同作用。钢渣40%~50%，矿渣30%~40%，脱硫石膏10%~15%。

(2) 抗压强度：3天：15~25 MPa，28天：40~60 MPa；

(3) 凝结时间：初凝：45~120 min

(4) 固废掺量：100%。

(5) 相关产品满足《混凝土用复合掺合料》(JGT486-2015)、《固废基胶凝材料应用技术规程》(TCECS689-2020)等的要求。

4.技术功能特性

(1) 冶金渣协同开发低碳多元胶凝材料技术是一种以工业固废为唯一原料，通过物理化学激发实现胶凝性能的新型绿色建材技术。

(2) 替代传统水泥，解决工业固废堆积、资源浪费及高碳排放问题。

5.应用案例

技术提供单位为首钢京唐钢铁联合有限责任公司。2022年至今，该产品已在首钢京唐钢铁联合有限责任公司、唐山师范大学、北京服贸会、马城铁矿、承德铁矿等应用。

6.未来推广前景

低碳多元胶凝材料市场正处于政策红利释放期与技术商业化拐点，未来五年将迎来爆发式增长。企业需抓住“固废资源化+低碳化”双主线，突破原料标准化与成本瓶颈，抢占千亿级绿色建材市场先机。在“双碳”目标与全球循环经济浪潮下，该技术有望重塑建材行业格局，成

为可持续发展的核心引擎。

（二）高炉熔渣显热利用及多固废协同制备低碳岩棉关键技术

1.适用范围

高炉熔渣、铁尾矿、粉煤灰等固废的综合利用。

2.技术原理及工艺

技术原理：高炉渣含有 SiO_2 、 Al_2O_3 、 CaO 、 MgO 等成分，与岩棉组成相似。但是其酸度系数小于1.0，达不到岩棉产品对酸度系数大于1.6的要求，因此需对高炉熔渣进行组分调质。本技术利用含 SiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 等关键组分的铁尾矿、粉煤灰等固废，对高炉熔渣进行成分调整，获得合格的岩棉熔体。经离心成纤、摆锤、固化等流程制备出低碳岩棉产品。本技术通过构建电炉电磁场—温度场—流场多物理场耦合数学模型，明确电炉炉壁冷却强度—挂渣厚度控制算法，研发出自结耐材长寿电炉装备技术，优化炉型参数设计，实现高效熔制—自结耐材—熔体均化，延长电炉寿命。

技术工艺：将高炉熔渣缓慢匀速兑入电炉装备，按比例添加固废辅料对熔体成分进行调质，经熔化、均化得到合格岩棉熔体。熔体流入四辊离心机，形成无机纤维，同步喷胶，再经集棉、摆锤、叠棉、固化成型、切割、打包等工序，制备成不同容重、尺寸的岩棉产品。工艺流程如图1所示。

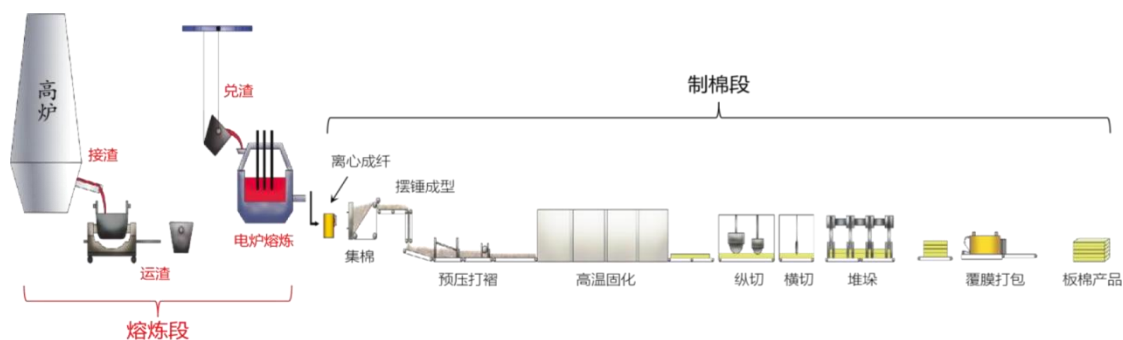


图1高炉熔渣制备岩棉工艺流程图

3.技术指标

- (1) 固废利用率达100%；
- (2) 吨岩棉能耗低于165 kgce，较传统冷料工艺节能19%以上；
- (3) 吨岩棉碳排放小于0.6 t，较传统冷料工艺减碳28%以上。
- (4) 产品按规格型号满足《建筑用岩棉绝热制品》（GB/T 19686-2015）或《建筑外墙外保温用岩棉制品》（GB/T 25975-2018）的要求。

4.技术功能特性

- (1) 本技术可实现高炉渣、铁尾矿、粉煤灰等固废全量替代玄武岩、白云石等天然矿石，制备不同酸度系数的岩棉产品，实现固废资源化、高值化。
- (2) 本技术研发的自结耐材长寿电炉装备技术适用于热熔渣制棉工艺，可使电炉耐材寿命延长至3倍以上，提升电炉连续稳定运行能力。

5.应用案例

技术提供单位为宝武集团环境资源科技有限公司。
2023年至今，该技术及装备已在宝武环科山西资源循环利用有限公司投入应用。

6.未来推广前景

本技术应用于工业固废资源化利用领域，适用于高炉渣、铁尾矿、粉煤灰等固废的综合利用，将固废制备成高附加值岩棉产品，应用于保温隔热建材领域。技术应用于宝武环科山西资源循环利用有限公司岩棉产线，近三年消纳高炉渣等固废2.15万吨，该产线减排6.79万吨CO₂，产品涵盖建筑保温、钢结构夹芯板和外墙外保温等。目前，宝武环科正在进行产业化复制，预计三年后形成20万吨产能规模。

本技术不仅可以高效回收高炉熔渣显热能源，还可以大幅提升高炉渣、铁尾矿等工业固废的附加值，开创了“以废代矿、显热利用、低碳制造”的循环经济新模式。本技术既有助于冶金行业的资源循环利用，又有助于岩棉制造技术的绿色低碳发展，具有良好的经济效益、环境效益和社会效益，发展前景广阔。

（三）钢铁冶金难处理渣尘泥无害化处理与资源化综合利用技术装备

1.适用范围

钢铁企业高锌高铁渣尘泥资源化、高值化利用。

2.技术原理及工艺

技术原理：本套装置是利用等离子电弧放热在反应核心区获取1800℃以上的高温，实现多种金属高温熔融、深度还原。通过金属高温熔点沸点不同，实现多种金属蒸馏分离。低沸点单质金属充分蒸发分离并回收；高沸点金属以金属相进入铁水与流渣分离，实现多金属深度还原分离。通过微晶固化、晶格包裹、还原安定方法，实现渣的无害化资源化。

技术工艺：钢铁冶金难处理渣尘泥与含碳还原剂、调渣剂按不同的化学成分放入封闭的料仓内，通过装有电子秤的皮带将配料后的原料输运至搅拌机混匀，压制成型，随后进入等离子熔融炉还原、调质、冶炼，还原铁水浇注成生铁块，冶炼烟尘经过分类收集后得到富锌粉末作为有色炼锌原料销售，玻璃化冶炼渣现场粒化可做普通建材材料。

3.技术指标

(1) 回收的生铁块，Fe含量>96%；

(2) 铅锌等有色金属高效收集，回收率：其中Zn>98%，Pb>98%，Ni>95%，Cr>95%；锌粉富集物满足标准《锌冶炼用氧化锌富集物YS/T1343-2019》，供给有色冶炼作为原料；

(3) 风淬粒化渣无害化，符合《固体废弃物玻璃化处理产物技术要求GB/T41015-2021》，可用作抛丸料、建筑混凝土骨料等。

4.技术功能特性

（1）预处理系统：计量、配料、混匀渣尘泥，压球造块备料；

（2）熔融还原分离装置：核心“一步法”高温深度还原，对渣尘泥实现“解毒”，并产生铁块；

（3）烟尘回收装置：按粒径组分分级分离烟尘，分类回收高值资源；

（4）渣处理装置：流态渣原位调质风雾淬急冷，实现玻璃渣粒化，锁定残留重金属，无害化资源化利用。

5.应用案例

技术提供单位为江阴硕人节能环保科技有限公司。
该技术在江阴兴澄特种钢铁有限公司应用。

6.未来推广前景

该技术装备处理含铁、铅、锌、镍、铬等有毒金属的冶金渣尘泥，有效解决有价金属组分提取分离难题。可降低污染与环境治理成本，提高二次资源利用率，减少矿产开采及对外依存度。助力电炉短流程炼钢、不锈钢尘泥处理，也可适用于“无废城市”垃圾飞灰熔融玻璃化及西部低品位杂矿冶炼，应用前景广阔，具有推广价值。

（四）钢铁冶金除尘灰回转窑碳基直接还原铁技术

1.适用范围

各类含铁、含锌、含碳尘泥的综合回收利用。

2.技术原理及工艺

技术原理：利用锌沸点较低（907℃）、高温易挥发的性质，通过还原使粉尘中的锌挥发再富集回收；直接还原铁的基本原理是利用 Fe_2O_3 与尘泥中的碳在低于熔化温度（ $<1250^\circ\text{C}$ ）的状态下发生直接还原反应生产金属铁的过程。

技术工艺：根据各类除尘灰中铁、锌、碳、钙、硅等核心元素含量，按比例将原料除尘灰送往混料机，确保混合料成分稳定，加少量水混匀、混合料制粒后送入回转窑进行煅烧还原。回转窑使用高炉煤气燃烧器提供热量，物料经预热带水分蒸发、

高温带氧化物直接还原。锌蒸汽从窑尾排出，经表冷沉降、余热锅炉冷却形成氧化锌粉尘，经布袋收尘器收集包装后外售，尾气脱硫后由烟囱排出。铁元素还原成金属化球团由窑头排出，热送炼钢转炉。

3.技术指标

（1）氧化锌脱除率超过99.9%，氧化锌含量 $>60\%$ ；

（2）直接还原铁球团全铁品位 $>60\%$ （金属化率 $>70\%$ ）；

（3）单位产品综合能耗 $<85\text{ kgce/t}$ 。

4.技术功能特性

（1）碳基还原剂定向活化，采用配加改性生物炭、焦炉除尘灰及含碳量较高的尘泥，将还原效率提升40%，

二氧化碳排放降低65%；

（2）多金属分步提取工艺，建立“低温脱锌—中温还原铁”的精准温控模型，锌挥发率和金属铁回收率大幅提升；

（3）过程能效优化，通过精准配料实现入窑物料成分稳定，充分回收利用烟气余热，系统能耗较传统工艺下降60%。

5.应用案例

技术提供单位：山东鲁新国合节能环保科技有限公司，2023年7月至今该技术已在石横特钢集团有限公司应用。

6.未来推广前景

钢铁行业规模庞大，每年产生大量含铁含锌尘泥。随着钢铁产量的持续增长以及环保压力增大，钢铁企业对尘泥综合回收技术的需求不断攀升，市场空间巨大。2024年全国钢铁产量9.9亿吨，按8%收尘率计算含铁粉尘约8000万吨，可回收铁元素2700万吨（综合含铁品位45%，回收率75%），按铁水价值3000元/吨计算，可回收利用价值800亿元，提锌约90万吨（综合含锌品位1.5%），可回收利用价值207亿元，产值过千亿元。

（五）蒸压硅酸盐骨料的水热合成技术及装备

1.适用范围

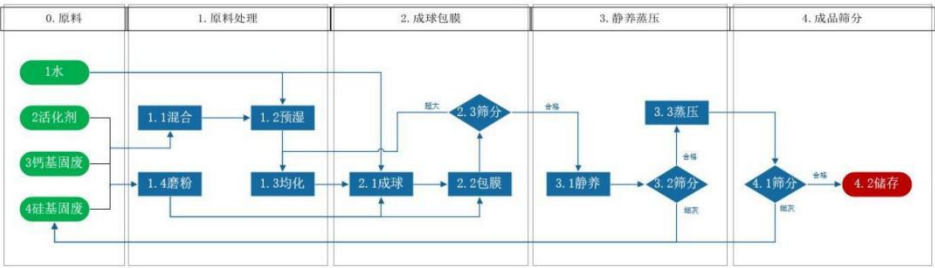
冶金渣综合利用。

2.技术原理及工艺

技术原理：本技术采用CaO—SiO₂—H₂O三元材料体系，辅以少量的活化剂，在高温条件下进行水热合成反应，生成托勃莫来石（5CaO·6SiO₂·5H₂O）、水化硅酸钙C-S-H（B）等产物。

Ca(OH)₂ + SiO₂ + H₂O → 5CaO·6SiO₂·5H₂O 其反应产物有一定数量，且与原料中未反应的SiO₂晶体在微集料效应影响下，形成以SiO₂为框架的稳定结构。

技术工艺：该技术采用粉体作为原材料，多种原料经过配料、混合、均化后形成大量的球核，这些球核在成球设备中迅速滚大成型，再经多层多次的包膜形成层壳结构的球状半成品。待在特定条件下养护的半成品具备一定的强度后，转移到蒸压釜中进行水化反应生成蒸压硅酸盐骨料。最后分级包装即可出厂。



3.技术指标

固废在全部原料中质量占比达到99.5%；

产品性能指标：

筒压强度	堆积密度	表观密度	吸水率	软化系数	坚固性
8~30 MPa	800~ 1200 kg/m ³	1600~ 2100 kg/m ³	7%~15%	≥0.85	<0.5%

生产能耗为烧结骨料的25%；

以年产100万吨蒸压硅酸盐骨料的生产线为例，占地约60亩，设备装机总功率约4500 KW，I/O控制点12500个，可连续生产，每班4~7人监控操作。

4.技术功能特性

（1）同时利用两种或多种固废作为原料，可实现全固废处理利用，生产成本约50元/吨；

（2）采用高温水热合成技术，吨蒸汽耗量约80 kg，相当于传统蒸压硅酸盐制品能耗的30%；

（3）生产线采用集中自动化控制，生产过程连续进行，产品性能稳定；

（4）产品以托勃莫来石为主要物相，水化产物呈稳定的网状或者针状结构，产品表观密度低、强度高、耐久性好；

（5）产品独有层壳结构，具有成分梯度和结构梯度，可在混凝土中与胶凝材料形成更高强度的界面层，从而改善混凝土界面性能；

（6）产品有吸水释水特性，在混凝土中表现出良好的内养护作用，可减少70%混凝土早期自干燥收缩，降低混凝土早期开裂风险，提高混凝土抗渗性能；

（7）产品可提高混合材掺量，减少水泥等胶凝材料用量，进而降低混凝土生产成本；

（8）产品应用在混凝土中具有级配可控和良好的施工性能。

5. 应用案例

浙江中劲环保科技有限公司作为该技术的唯一持有人，自2019年以来已经支持建设包括宁波北仑、福鼎臻润、陕煤神木恒稳等3项应用项目。均建成投产。

其产品应用于杭州亚运会排球场馆、宁波地铁五号线项目、舟山高速收费站耐磨混凝土项目、昆明滇池斗南湿地建设工程项目、成都市大邑县污水处理厂、岳阳市中心城区污水系统综合治理等工程项目。

6. 未来推广前景

该技术及装备以电力固废、化工固废、矿山尾矿、冶金固废、建筑垃圾等为主要原料来源，可实现大掺量、全固废处置，其产品为人造骨料可替代天然砂石，也可作为地坪填充料广泛应用于建筑领域，同时它还是非常好的生物滤料。在工业固废处理行业、建材行业、水处理行业、环保装备等方面都具有推广价值。

（六）钢渣法脱硫及副产物综合利用

1. 适用范围

工业炉窑烟气脱硫，利用钢渣作为脱硫剂。

2. 技术原理及工艺

技术原理：钢渣法脱硫及副产物综合利用技术的基本原理如下：

（1）利用钢渣中的硅酸三钙（ $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ）、硅酸二钙（ $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ）水化、酸化解析，并与吸收的 SiO_2 反

应，生产硫酸盐等脱硫副产物。

(2) 利用钢渣脱硫副产物中的 SO_4^{2-} 、Ca、Fe等与土壤中的K、Na等离子交换，生成硫酸盐析出，从而降低盐碱沙荒地的土壤含盐量。

(3) 利用钢渣中Ca、Fe硫酸盐，用作水泥调凝剂，改善水泥性能。

技术工艺：将钢渣磨制成微粉，加水调浆水化，再加入循环浆池在酸性条件下酸化解析成脱硫浆液，通过专用脱硫设备“DS-多相反应器”与含二氧化硫烟气反应，并得到脱硫副产物。脱硫反应后浆液经过调节pH值、脱水生产脱硫钢渣，分别用于土壤改良剂用于盐碱沙荒地改造和用作水泥缓凝剂和生料配料剂。

3.技术指标

根据钢渣法脱硫与石灰石脱硫比较：

(1) 脱硫成本：600~800元/t SO_2 ；

(2) 脱硫副产物可用于土壤改良或水泥缓凝剂和生料配料剂；

(3) 每处理1吨 SO_2 可利用约2吨废钢渣

(4) 每处理1吨 SO_2 减少 CO_2 排放0.7t。

4.技术功能特性

(1) 通过脱硫综合利用废钢渣，节省石灰石资源消耗，还能减少 CO_2 排放。

(2) 钢渣脱硫副产物可用于盐碱地改造，也可用作水泥原料。

5.应用案例

该技术是宁波太极环设备有限公司研发。2010年至今，该技术及装备已在唐山德龙钢铁有限公司、内蒙古包钢庆华煤化工有限公司等公司建成15套钢渣脱硫示范工程。

6.未来推广前景

目前钢渣法脱硫及副产物综合利用技术在国内已经推广应用了15套，具有进一步推广的基础条件。预测未来3年内，该技术还可以推广9~12套，项目合同额预计1亿~1.5亿元，可实现SO₂有效减排约8万~15万吨，CO₂减排4万~6万吨。随着钢渣法脱硫的普及率进一步提升，经济和社会效益显著。

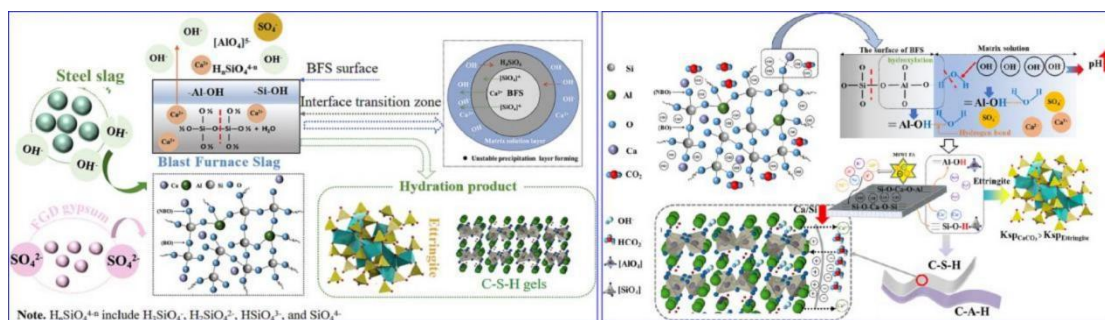
（七） 钢铁渣复合胶凝材料生产技术与应用

1. 适用范围

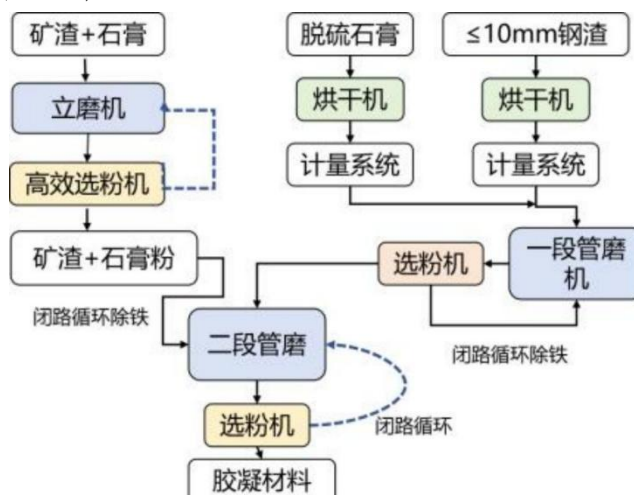
钢渣综合利用。

2. 技术原理及工艺

技术原理：本技术基于“复盐效应”和“硅的四配位同构化效应”，利用钢铁渣与其他不同固废中硫酸盐（SO₄²⁻）、氯盐、碱性物质（OH⁻）的协同作用，促使Si-O-Si、Si-O-Al、Al-O-Al等多种价键解聚、再聚合，推动反应不断进行生成水化产物钙矾石（AFt）、C-S-H凝胶、Friedel's盐，进而使制备出的钢铁渣复合式胶凝材料（又称固废基胶凝材料）具有类似于水泥一样的水硬性。



技术工艺：通过辊压机对钢渣进行预处理，强化多道系统除铁，然后采用多阶段超细粉磨，对钢渣进行物理改性处理。然后采用立磨与球磨联合粉磨矿渣、脱硫石膏，提高粉磨效率。采用悬浮分散机构预分级，对物料充分分散和分级。形成了钢渣细化+矿渣脱硫石膏联合粉磨+高效选粉的最佳生产工艺。



3.技术指标

(1) 钢铁渣复合胶凝材料性能满足国家标准《钢铁渣复合料》GB/T28294-2024各项技术指标的要求；

(2) 钢铁渣复合胶凝材料碳排放约为P·O42.5水泥的10%，能耗约为20%，价格降低50%~70%。

4. 技术功能特性

- (1) 钢铁渣复合胶凝材料的压折比为0.20~0.31；
- (2) 钢铁渣复合胶凝材料7 d水化热 $<200\text{ J/g}$ ；
- (3) 钢铁渣复合胶凝材料28 d氯离子扩散系数 $<0.4\times10^{-12}\text{ m}^2/\text{s}$ ，28 d抗硫酸盐侵蚀系数 $K_c>1.2$ 。

5. 应用案例

技术提供单位为河北省建筑科学研究院有限公司。2014年至今，该技术及装备已在首钢京唐钢铁联合有限责任公司、北科蕴宏（三河市）低碳科技有限公司、山西蕴宏环境科技发展有限责任公司、安徽禄弘新材料科技有限公司、河北德隆再生资源科技有限公司、保定市徐水区磐孚新材料科技有限公司等单位应用。

代表性工程包括：北京国际服贸会、石家庄复兴大街工程、雄安新区容西1号220 kv输变电工程、中铁十六局集团有限公司容西片区G单位安置房及配套设施项目、黄石市东楚奥体新城项目、保定春熙华普项目、保定康丽养老项目等。

6. 未来推广前景

传统水泥行业产生了全国约10%的碳排放，在“碳达峰”“碳中和”战略推进过程中面临着低碳化转型的挑战。另外，我国也是钢铁、煤电、矿山、化工等大宗固废排放量最大的国家之一，这些固废的利用一直是困扰我国的难题。本项目利用多源固废制备钢铁渣复合胶凝材料，可替代传统水泥用于工程建设，为上述困扰我国实现可持续发

展的难题，提供了一种行之有效的解决办法，得到何宏平、彭苏萍、岳清瑞、金涌、侯增谦、吴爱祥等多位院士的高度评价。此外，本项目技术贯彻了《关于“十四五”大宗固体废弃物综合利用的指导意见》，响应了《2030年前碳达峰行动方案》等多项国家政策对低碳胶凝材料研发应用的号召，解决了现有胶凝材料固废用量小、成本高、无标准可依、难以产业化、应用困难等问题，具有重大的推广意义和必要性。在国家政策支持下，本技术具有广阔的市场应用前景。

（八）冶金含铁含锌尘泥转底炉资源化利用技术

1.适用范围

冶金含铁含锌尘泥资源化利用。

2.技术原理及工艺

技术原理：冶金企业产生的含铁含锌尘泥含有铁、碳等有价值元素，也含有锌等有害元素，堆存、外售易造成环境污染，直接返回铁前系统，锌的不断富集会严重影响高炉生产顺行和使用寿命。本技术在转底炉高温还原气氛下，球团中的铁、锌氧化物与碳发生还原反应，生产金属化球团和氧化锌粉，综合回收铁、锌资源，实现资源的再生、循环利用。

技术工艺：含铁含锌尘泥经配料、混料、成型制成含碳球团，烘干后进入转底炉焙烧还原，生产出的金属化球团可供炼铁、炼钢工序直接使用；球团中的氧化锌被还

原成金属锌挥发进入烟气，在烟道中再次氧化生成氧化锌，烟气通过余热锅炉回收热量生产蒸汽后进入布袋除尘器，收集得到富含氧化锌的粉尘，供炼锌厂利用；综合回收铁、锌资源。

3.技术指标

（1）球团金属化率 $\geq 75\%$ ，比国内同类技术提升7%~14%；

（2）原料脱锌率 $\geq 90\%$ ，比国内同类技术提升5%~11%；

（3）综合返粉率 $\leq 25\%$ ，比国内同类技术下降30%~38%；

（4）生产线连续运行时间超过6个月，比国内同类技术提升100%。

4.技术功能特性

（1）该技术可对冶金含铁含锌尘泥中含有的锌等有害杂质进行脱除，生产可直接供高炉、转炉利用的金属化球团及炼锌厂利用的氧化锌粉，实现资源的再生、循环利用。

（2）该技术提高了球团强度，有效降低了粉化率，提升了单位原料的产品球团产量；产品球团性能指标得到提升，提升了产品销售单价；提升了生产系统的稳定连续性、利用效率。

5.应用案例

技术提供单位为中冶南方都市环保工程技术股份有

限公司。该技术装备已在广西翅冀钢铁有限公司成功运用，项目规模20万吨/年。

6.未来推广前景

冶金含铁含锌尘泥转底炉资源化利用技术可应用于冶金企业处理冶炼工序产生的含铁含锌尘泥，生产金属化球团和氧化锌粉，综合回收铁、锌资源，实现资源的再生、循环利用；随着国家环保标准的不断提高，“固废不出厂”是钢铁行业发展的必然方向，钢铁企业处置冶金含铁含锌尘泥的潜力需求巨大。转底炉资源化利用技术能够实现含铁含锌尘泥的高效回收利用，具有较高市场推广价值。