

四川省水泥行业减污降碳优良实践案例

四川省环境政策研究与规划院
四川省水泥协会
天府永兴实验室减污降碳评估研究中心

目 录

01	全过程减排助力绿色低碳发展	1
02	“环保优先”引领建设绿色工厂	5
03	推动用能方式绿色化转型	7
04	原（燃）料替代引领绿色低碳转型	10
05	引入二线 RDF 替代化石燃料	13
06	水泥回转窑高效协同处置固废	15
07	篦冷机“以旧换新”助推降碳	17
08	水泥磨系统化节能增效改造	19
09	窑胴体辐射热赋能智能浴室	21
10	超低排放改造引领环保绩效升级	24
11	水泥回转窑 SNCR/SCR 联合脱硝	27
12	水泥熟料线 SCR 脱硝技改	29
13	窑尾 SCR 脱硝系统技改减排	32
14	窑系统自还原脱硝升级改造	34
	致 谢	37

前 言

水泥行业是国民经济的基础产业，也是二氧化碳和污染物的重要来源。在追求发展的过程中，传统水泥产能过剩、高消耗、高排放等问题和挑战日益突出。全面推进美丽中国建设新形势新背景下，必须加快转变发展方式，协同推进降碳、减污、扩绿、增长，坚定走生态优先、节约集约、绿色低碳的高质量发展之路。

四川省是西部水泥产能规模最大的省份，水泥企业分布广泛、数量众多。截至 2024 年 6 月，拥有全能生产线 108 条（在产 91 条）、水泥熟料日产能 33.2 万吨（在产 29.55 万吨），水泥年生产能力 1.79 亿吨以上。随着资源环境约束逐渐收紧，水泥行业逐渐走向绿色低碳转型之路。

为宣传和展示全省水泥行业绿色低碳高质量发展进展成效，引领和促进水泥行业节能减污降碳和转型升级，加快提升行业碳管理能力，在中德气候变化合作“支持实施中国国家自主贡献”项目支持下，四川省环境政策研究与规划院、四川省水泥协会、天府永兴实验室减污降碳评估研究中心紧扣源头防控、过程降碳、末端减排，从节能降耗、燃料替代、超低排放、设备更新、数字赋能等方面，联合征集和发布一批水泥行业减污降碳优良实践案例。

编制组

2025 年 6 月

01

全过程减排助力绿色低碳发展

一、基本情况

巴中海螺水泥有限责任公司着眼破解制约发展的能源环境问题，突出科技创新和技术应用，围绕源头减排、过程减排、协同减排实施系列改造升级项目，打造“水泥窑协同处置城市生活垃圾+纯低温余热发电+光伏发电+循环经济”的全产业链新型现代化建材企业，熟料单位产品综合能耗稳定在 92 千克标准煤/吨，较行业能效标杆水平提升 8%，先后获得国家级绿色工厂、建材行业绿色工厂、建材行业绿色制造标杆企业、省级节能降碳标杆企业、重点用能行业能效“领跑者”企业等荣誉称号。

二、主要做法

（一）优化用能结构源头减排

探索能源多元化供给路径，建成投产装机容量为 1.15MWp 的光伏发电项目，打造由光伏组件、组串逆变器、交流汇流箱、箱式变压器等设备组成光伏发电系统，年平均发电量近 100 万千瓦时，每年可节省标煤 319.1 吨，相当于每年替代减

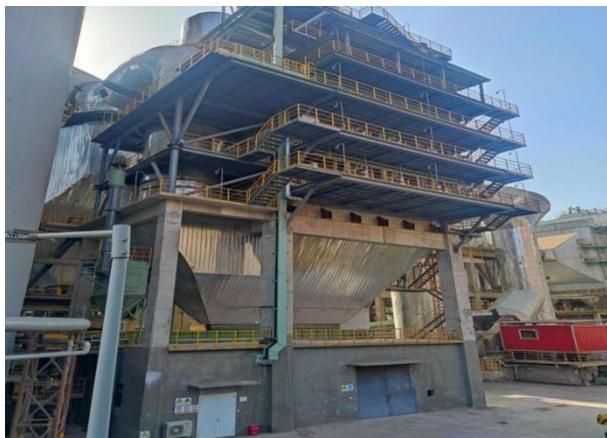
排二氧化碳约 836 吨、二氧化硫约 2.7 吨、氮氧化物约 2.4 吨。



▲光伏发电项目示意图

（二）实施绿色技改过程减排

实施节能减排技术改造，大幅减少污染物排放。开展窑头窑尾电收尘改袋收尘，对窑头窑尾电收尘极板和极丝进行割除，取消顶部变压器和壳体，增加滤袋箱室及通道，配套脉冲振动反吹系统。技改后，烟气排放浓度从 20 毫克/立方米降至 5 毫克/立方米以内，降幅高达 75%，年减排粉尘约 80 吨，单位熟料产品综合电耗下降 2 千瓦时/吨。实施选择性非催化还原（SNCR）系统技改，采用选择性催化还原（SCR）脱硝技术，提高氨反应效率，降低氨逃逸率。技改后，氮氧化物排放浓度从 300 毫克/立方米降至 70 毫克/立方米，降幅高达 76.7%，年减排氮氧化物 700 吨。



▲选择性催化还原脱硝设施

（三）处理生活垃圾协同减排

投资 8600 万元建设 200 吨/天的城市生活垃圾处理项目利用气化炉在生活垃圾送入水泥窑系统之前将未分类的垃圾破碎、气化成含有一定热值的气体，在熟料烧成中完全分解并回收热量后，直接用于熟料烧，有效降低烧环节原煤消耗，每年可替代减少二氧化碳排放约 2.7 万吨。截至 2024 年 12 月，累计处理城市生活垃圾 41 余万吨，实现城市垃圾的无害化处置。

三、推广价值

通过加大减污降碳项目投资和技术应用力度，推动“源头减排、过程减排、协同减排”齐发力，既降低了化石燃料消耗

强度，减少了能源购置成本支出，提升了城市垃圾的处置能力，也实现了二氧化碳和大气污染物的减排，达到了经济效益、环境效益的双赢。

02

“环保优先” 引领建设绿色工厂

一、基本情况

四川国大水泥有限公司秉持“全封闭、全收尘、全消音、全变频、全利废”的新型节能环保理念，按照“安全优先、环保优先、质量优先”管理目标，建设“高效、节能、环保”的现代化环保型水泥企业，创建为国家级绿色工厂。



▲四川国大水泥有限公司厂区

二、主要做法

（一）推行智能制造

坚持走智能制造之路，实施窑专家系统、智慧消防预警系统、高效智能脱硝系统、一卡通物流管理系统、智能安全管理系统、水泥配料优化、在线分析仪、数字化矿山、废弃物衍生燃料（RDF）燃料替代等 10 个智能环保项目，探索水泥企业节能降耗、提质增效、绿色智能制造可行路径。

（二）深挖减排潜力

推广使用替代燃料、原料，碳排放强度低于行业标准，每年减少碳排放超过 6.6 万吨。在熟料煅烧工序采取节能电机和变频驱动措施，以及利用中子活化仪实现自动配料，降低熟料生产过程中的能耗，实现水泥生产线全工序达国家一级能耗水平。通过污水处理系统，实现全部污水废水回收利用，达到污水废水零排放目标。

三、推广价值

绿色制造是一种综合考虑环境影响和资源效益的现代化制造模式，绿色工厂是绿色制造体系的重要类型。通过优化企业治理目标和体系，突出数智赋能，全过程、全体系推动生产绿色化、清洁化，可以将对环境的影响最小化，资源利用率最大化，平衡企业经济效益和社会效益。

03

推动用能方式绿色化转型

一、基本情况

达州海螺水泥有限责任公司坚持走绿色转型、数字化赋能企业高质量发展道路，聚焦碳达峰碳中和目标，全面开展节能降碳工作，做实能源绿色低碳转型大文章，不断提升绿色低碳发展水平。



▲分布式光伏电站

二、主要做法

(一) 开发利用新能源

采用“分块发电、就地并网”方案，建设 1.93MWp 分布

式光伏发电项目，充分利用构（建）筑物屋顶和人工湖水面安装光伏组件，人工湖、耐火材料库及专家公寓屋面光伏组件采用最佳倾角 15°布置，员工宿舍楼光伏组件按照屋面坡度 25°布置，联合储库、石膏堆棚光伏组件按照屋面坡度 5°布置。综合考虑厂区建筑物类型及生产生活用电消纳情况，因地制宜利用太阳能资源发电，光伏电站每年可提供绿色电能 159.35 万千瓦时。

（二）提升能源利用效率

推进窑磨系统风机变频器节能技改，主要开展煤磨主排风机低压变频器改造、窑头窑尾排风机变频改造、水泥磨磨尾通风机变频控制改造、水泥磨循环风机变频器节能技改、原料磨循环风机变频技改等项目，每天可节省用电量约 2 万千瓦时。

（三）增强燃料替代能力

配套建设 1 个一般固废入窑系统，主要完成秸秆、废纺织物、橡胶粉、市政污泥的卸车、储存、输送等工序，经皮带机输送至 2#水泥窑窑尾分解炉焚烧。2#水泥窑每年消耗替代燃料约 5.5 万吨，其中 1 万吨秸秆、2.5 万吨废纺织物、2 万吨橡胶粉。2#线每年可节约原煤 3.2 万吨。

三、推广价值

通过新能源发电补充、变频节能改造和替代燃料资源化综合利用，降低单位产品能耗，减少化石能源消耗，既达到绿色清洁、节能低碳的目的，又满足公司可持续发展需求，经济效益和社会效益显著。

04

原（燃）料替代引领绿色低碳转型

一、基本情况

北川中联水泥有限公司积极践行“材料创造美好生活”的使命，深入开展绿色低碳发展行动，通过采取原料替代、燃料掺烧、绿电自给、电动运输、数智升级等措施，持续减少化石能源消耗、二氧化碳和污染物排放强度，熟料单位产品综合能耗（97.65 千克标准煤/吨）达到能效标杆水平，获国家级绿色工厂称号并通过低碳产品认证。

二、主要做法

（一）推广低碳替代原料

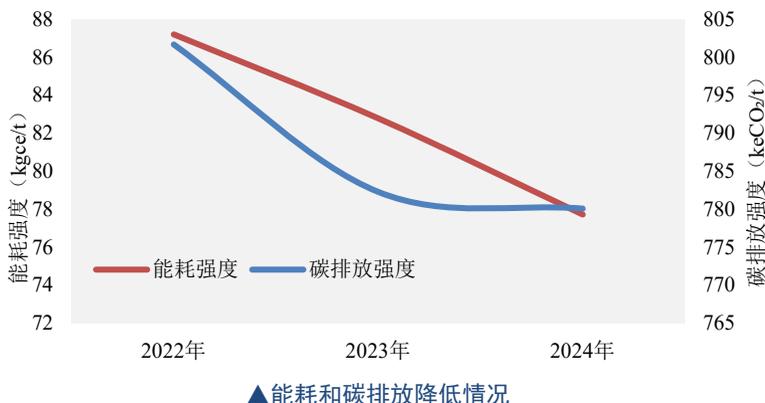
相比石灰石，黄磷渣、铜渣、粉末（硅石）、有色金属灰渣、粉煤灰、采矿选矿废渣、骨料尾料、建筑垃圾、磷石膏、脱硫石膏、矿渣等原料煅烧环节分解温度更低，既降低了煅烧温度、节约能源，同时减少了因高温煅烧产生的二氧化碳排放。通过原料替代，绿色物料总体占比达到 23.26%，实现了工业废渣的资源化利用。



▲北川中联水泥有限公司厂区

（二）实施燃料清洁替代

经过筛选和处理，将城市生活垃圾等作为水泥窑替代燃料，设计改造水泥窑燃烧系统，以适应不同种类替代燃料的燃烧特性；优化燃烧器等设备，确保替代燃料充分、稳定燃烧。替代燃料的使用比例可达到燃料总量的 10%—15%，每年可替代减少煤炭消耗 1 万吨以上，单位产品煤耗从 2022 年的 98.68 千克吨降至 2024 年的 91.79 千克吨，二氧化碳排放显著减少。



(三) 深挖协同减排潜力

利用建筑屋顶、闲置地面、停车场等，布设高效光伏组件，年发电量 350 万千瓦时，相当于每年节约标煤 1100 吨，降低了能源消耗和运营成本。推动将矿山运输车辆部分更换为新能源矿车，降低二氧化碳和氮氧化物排放。实施“智改数转”，推动智能感知、智能配料、智能巡检，实时监测温度、压力、流量等关键参数，自动调整窑炉运行参数，降低产品制造成本，实现劳动生产率提高 30%。

三、推广价值

推广使用替代原（燃）料，一方面，可显著降低企业在燃料、原料等方面的生产成本。另一方面，有助于减少二氧化碳和大气污染物排放。此外，有助于消纳大宗工业固废，促进资源的循环利用，解决部分工业废渣的堆存多和处理难的问题。

05

引入二线 RDF 替代化石燃料



一、基本情况

广元海螺水泥有限责任公司是四川省北部、陕甘南部最大的水泥建材生产企业，拥有 2 条 4500 吨/日新型干法水泥熟料生产线、年产 440 万吨水泥粉磨系统、18 兆瓦纯低温余热发电系统、年产 100 万吨骨料生产线和年产 200 万吨骨料机制砂生产线。公司通过采用二线垃圾衍生燃料（RDF），实现了节煤降碳的目标。



▲ 广元海螺水泥有限责任公司厂区

二、主要做法

（一）充分调研论证可行性

RDF 替代燃料是一种通过对城市固体废物进行破碎、分

选、干燥、磁选、压缩成型等处理，去除不可燃物质而制成的燃料。RDF 替代燃料具有较高的热值，可代传统燃煤。经广泛调研和深入论证，公司利用独特的地理位置、周边生物质资源较丰富、再生资源回收企业聚集等优势，采用 RDF 技术路径。

（二）推进替代燃料综合利用

投资 475 万元实施二线 RDF 替代燃料综合利用项目。使用废旧衣物、棉被等作为 RDF 替代燃料，通过输送较刀、大倾角皮带斜拉至预热器塔架，经过螺旋输送机将替代燃料送入 CPF 炉内，最后进入分解炉。项目实施后，不仅充分利用了废弃资源，减少原煤使用比例，同时净化了焚烧烟气。按照每窑每年运转 330 天计算，每年使用 RDF 替代燃料最多可替代 2.5 万吨原煤。

三、推广价值

燃料清洁是水泥行业减污降碳的重要路径。通过实施水泥窑 RDF 替代燃料综合利用改造项目，减少了原煤使用比例，降低了碳排放强度，可为水泥行业在碳排放双控和碳定价环境下提升低碳优势提供了一种新选择。

06

水泥回转窑高效协同处置固废

一、基本情况

自贡金龙水泥有限公司利用水泥回转窑技术，通过引入先进的预处理与投加系统，将废旧塑料、沾染物等固体废弃物转化为水泥生产的替代燃料，实现固体废弃物的协同处置与燃料的替代利用，不仅减少了化石燃料的使用量，还实现了固体废弃物的无害化、资源化利用。2024年，公司成功创建为自贡市首批“无废细胞”——无废工厂。

二、主要做法

（一）提高燃烧性能，减少化石燃料消耗

工业固体废弃物进厂后分区堆放，采用分选、撕碎等工艺对废弃物进行预处理，提高其燃烧性能。将预处理后的废弃物直接投入预烧炉中，作为替代燃料使用，减少煤粉等化石燃料的消耗。

（二）配套治气设施，提升系统运行效率

利用智能化监控系统，实时监测协同处置过程中的各项参

数，确保系统稳定运行。不断优化升级协同处置技术，提高废弃物处置效率与能源利用效率。在协同处置废弃物过程中，加强烟气净化设施的运行管理，确保烟气排放达到国家标准。

三、推广价值

作为循环经济的重要形式，水泥回转窑协同处置固体废弃物进而替代化石燃料，不仅有助于固体废弃物无害化、低碳化处理，还能有效降低水泥生产过程中的二氧化碳排放，有利于推动水泥行业的绿色低碳转型，具有推广价值。

07

篦冷机“以旧换新”助推降碳

一、基本情况

四川兰丰水泥有限公司是一家大型水泥制造企业，建有 2 条 4500 吨/天新型干法水泥生产线及配套的纯低温余热发电系统。公司将原厂址内 1#生产线三代篦冷机拆除更换为新一代节能环保篦冷机。



▲四川兰丰水泥有限公司厂区

二、主要做法

(一) 推动篦冷机更新换代

淘汰原有三代篦冷机设备，更换为史密斯四代新型篦冷

机。主要设备包括史密斯十字棒篦冷机 1 台（CB16×60iHRB）、辊破轴冷却机风机、辊破框架冷却风机、篦冷机冷却风机、空气炮、压缩空气及给排水管道阀门、进出风管非标件、H 型钢结构、耐火材料、保温等。

（二）挖掘新设备降碳潜力

设备更新换代后，降低熟料生产耗能，并使其快速降温，达到水泥品质改善效果。1#生产线按年产 150 万吨熟料计算，每年可节约用电 534.2 万千瓦时、节约标煤约 2381 吨。

三、推广价值

改造前，一线篦冷机设备陈旧、能耗高；篦冷机结构形式不合理，经常性更换篦床篦板，维修成本高；篦冷机出口熟料温度高，造成水泥品质不稳定；热回收效率差，余热发电量低下。改造后，降低了冷却机能耗，通过降低熟料温度实现水泥质量改善，提高了余热发电量，降低了维修费用，减少了篦冷机耗电量，具有良好的经济效益和推广前景。

08

水泥磨系统化节能增效改造



一、基本情况

四川嘉华锦屏特种水泥有限责任公司拥有两条 2500 吨/天新型干法水泥熟料生产线，年产量达 200 万吨，是攀西地区大型水泥生产企业和特种水泥制造基地。公司原配备 2 套 5600 千瓦水泥磨、2 台 1000 千瓦水泥磨排风机，能耗较高。为降低水泥粉磨工序能耗，公司对 1#线水泥磨实施系统化改造升级，技改后综合水泥电耗从 42 千瓦时/吨水泥以上降至 32.8 千瓦时/吨水泥，大幅降低了电耗强度。



▲四川嘉华锦屏特种水泥有限责任公司厂区

二、主要做法

（一）实施系统化改造

新建一套 HRM46.4Y 立磨预粉磨系统，与原有 $\Phi 3.8 \times 13$ 米水泥磨组成水泥半终粉磨系统。1#水泥磨系统球磨机按开路系统进行磨内改造、更换研磨体。保留原闭路系统中的斜槽、提升机、选粉机及后面配套的收尘器，将收尘风机电机增加变频器，使原风机变为变频风机。

（二）优化系统运行管理

立磨技改完成后采用立磨+球磨同时运行，一定程度上提高水泥产量、降低综合水泥能耗。但生产过程中通过实验对立磨进行小技改试生产后又发现，在粉磨低标号水泥时采用单开立磨粉磨也能完成生产任务，在单开立磨粉磨 32.5 水泥时能达 26 千瓦时/吨水泥的标准，且还有提升的空间。

三、推广价值

节能提效是最经济的降碳措施。通过实施水泥磨等水泥主要生产设施的系统化改造，可直接降低水泥生产成本，并在可控能耗水平下提升水泥产量，有利于提升企业在日益趋紧的节能降碳约束下的市场竞争力。



一、基本情况

四川宏云建材有限公司实施的 $\phi 4.3 \times 62\text{m}$ 新型干法回转窑系统窑胴体辐射热节能降耗降本增效技术改造项目，通过应用窑系统辐射余热温度差，建设智能化职工浴室，在开窑时浴室无需耗用任何能源和人力资源。项目实施后，智能化浴室系统运行稳定，实现无人值守，热水调整灵活、操作便利，员工洗澡问题得到有效解决，节能降耗降本增效符合预期。

二、主要做法

(一) 回收筒体余热

窑筒体外侧辐射换热水箱通过吸收窑余热将常温给水加热成高温热水，热水通过连接管和手动球阀及电动执行器 TR-15 开关阀门进入窑头储存水箱，长时间储存热水降温后可经管道循环水泵通过下部管道回到窑筒体外侧的集热水箱里，重新循环加热。储存水箱设计的水位计可自动补水并通过引出管输送到浴室供洗澡使用。



▲筒体余热特征

（二）优化水箱设计

集热水箱采用 8 毫米钢板制成，外设加强筋，以保证换热面的整体结构强度，在外壳上方设置吊耳，集热水箱下部与支撑梁直接相扣，方便换热面检修和拆卸。储存水箱由不锈钢板焊接制成，外部采用彩钢板，内部填充岩棉保温层，最大限度地减少换热面散热损失。

（三）建设智能浴室

浴室设备通过利用中控室 DCS 系统编程实现全自动控制，每班次用水结束 4 小时后进行一次集热水箱补水，储存水箱水位高于 1.2 米时关闭进水阀。若出现人为操作，则以人为操作为先，直到下一次自动控制的时间点，切换为自动控制状态，实现无人看守自动控制。浴室照明和通风采用微电脑时控

开关在浴室开放或关闭时间自动开启，实现无人值守控制闭环系统。

三、推广价值

通过窑筒体辐射余热回收系统，可生产大于 1.5 吨/小时的饱和热水（集热水箱恒温 95℃），满足职工洗澡需求，解决企业员工生活福利的后顾之忧。相比燃煤锅炉烧水洗澡，每年可节约用煤 155 吨，节省费用 22.63 万元/年。

10

超低排放改造引领环保绩效升级



一、基本情况

达州海螺水泥有限责任公司建有 2 条日产 4500 吨新型干法水泥熟料生产线和年产 440 万吨水泥生产线。公司始终坚持走绿色转型、数字化赋能企业高质量发展道路，2019—2024 年累计投入近 2.8 亿元，先后实施熟料线“电收尘改袋收尘”、低氮分级燃烧技改、增加 SCR 烟气脱硝系统、增建湿法脱硫项目、收尘器滤袋全面升级、全厂输送廊道封闭、运矿道路黑化等改造，大气污染物排放指标均优于国家标准，获评环保绩效 A 级企业。

二、主要做法

（一）开展超低排放改造

2019 年以来，先后实施 1#、2#熟料线“电改袋”改造、低氮分级燃烧技改、增加 SCR 烟气脱硝系统、湿法脱硫系统，同时完成现场 120 余台布袋收尘滤袋升级，主要大气污染物排放浓度大幅降低，排放总量大幅削减。改造后，氮氧化

物、二氧化硫、颗粒物排放量分别减少 84%、62%、68%，排放浓度分别控制在 50 毫克/立方米、35 毫克/立方米、10 毫克/立方米以内，优于超低排放管控要求。



▲ 1#、2#窑高温高尘 SCR 烟气脱硝系统

（二）治理无组织排放

加强对生产设施、物料运输通道、物料储存点和物料装卸点的扬尘治理，实施厂区无组织排放综合治理、包装车道扬尘治理、厂区非道路移动机械升级换新、石灰石皮带廊道噪声治理等项目，实现物料储存、输送环节全封闭，降低无组织排放，提升厂区及周边整体环境质量。

（三）创建环保 A 级绩效

以重污染天气绩效分级 A 级企业管理为抓手，坚持落实

污染物排放浓度控制和生产现场环保管控措施两手抓。2024年，大气污染物在小时值达标率方面，氮氧化物、二氧化硫、颗粒物达标率分别为 99.05%、99.47%、99.84%，满足绩效分级 A 级要求。同时，对标 A 级企业无组织管控要求，抓实常态化管理，落实物料输送、存储全环节封闭管理、固化洒水降尘等措施，形成长效机制。

三、推广价值

以超低排放改造为路径、重污染天气绩效 A 级创建标准为导向，充分利用先进污染治理技术，高投入实施环保技改，使各指标全面达到减排治污目标，并且逐步强化环保内控管理，通过自查自纠、逐步改进的方法，常态化规范运行 A 级企业标准，可提升企业环保管理整体水平。

11

水泥回转窑 SNCR/SCR 联合脱硝



一、基本情况

四川永祥多晶硅有限公司新材料分厂是永祥“从盐卤、烧碱、聚氯乙烯到电石渣制造水泥”循环经济产业链的重要组成部分，担任固体废物综合利用的重要角色，是永祥树脂公司、永祥多晶硅公司固体废物电石渣、滤渣的综合利用单位，先后获得省级资源综合利用基地、省级和国家级绿色工厂等荣誉。自 2022 年建成投产选择性催化还原（SCR）脱硝项目以来，氮氧化物、二氧化硫、颗粒物排放均达到环保绩效 A 级水平，吨熟料消耗氨水小于 4 吨。

二、主要做法

（一）探索深度减排技术

在原有水泥回转窑预热器选择性非催化还原（SNCR）脱硝基础上，探索增设 1 套高温高尘选择性催化还原脱硝设备，配套实施高温风机、尾排风机效能提升改造。改造后，烟气通过反应器，在反应器里面的催化剂的作用下，实现氮氧化物吸

收反应降低。



▲ 选择性催化还原脱硝设施

（二）释放技术减排效益

窑尾脱硝采用 SNCR 脱硝技术执行氮氧化物排放标准 100 毫克/立方米时，年排放量为 191 吨。增加 SCR 脱硝后形成 SNCR+SCR 联合脱硝系统后，执行氮氧化物排放标准 50 毫克/立方米，年排放量为 105 吨，平均减少氮氧化物排放 86 吨，显著减少了大气污染物排放。

三、推广价值

燃烧烟气中去除或减少氮氧化物，对控制和减轻大气污染至关重要。SCR 和 SNCR 作为最主要的两种脱硝技术，采用 SNCR/SCR 联合脱硝技术，可实现污染物治理效益的最大化，降低对区域空气质量改善的压力。



一、基本情况

广元海螺水泥有限责任公司按照持续改善空气质量有关政策要求，积极探索超低排放路径，实施 1#、2#水泥熟料生产线 SCR 脱硝技改项目。

二、主要做法

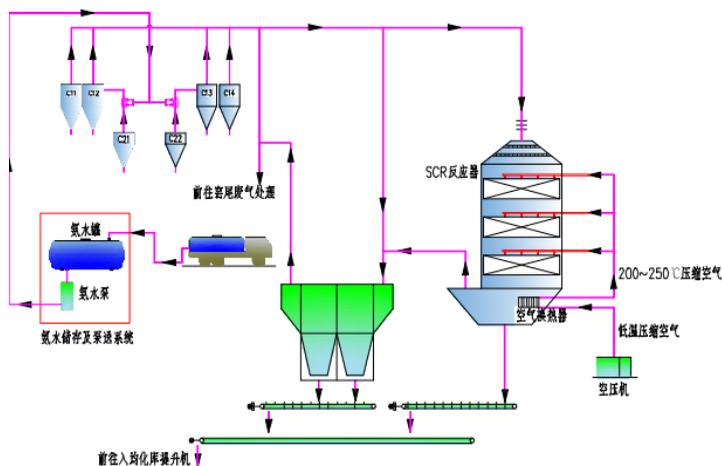
（一）改造烟风管道系统

SCR 脱硝系统取风点设置在窑尾 PH 锅炉风管之前，根据风管布置需要在窑尾出预热器出口主管道增设支管道和阀门系统，将气体接引入 SCR 反应器。正常生产中将窑尾高温烟气全部投入 SCR 反应器，进行脱硝反应后的高温烟气从反应器出口接入余热发电 PH 锅炉入口风管。脱硝系统进出风管上安装电动阀，实现 SCR 反应器与 PH 锅炉的串联运行或单独退出检修。在窑尾管道上设高性能密闭阀，严格控制系统漏风率。

（二）建设 SCR 反应器

SCR 反应器是脱硝系统的核心设备，氨水与烟气混合后进

入反应器，在催化剂的作用下，氨与氧化亚氮反应生成 N_2 和 H_2O 。反应器采用顶进风+底部上出风方式，结合现场工艺布置，SCR 脱硝系统与余热发电系统串联设计。两条生产线各配置一台 SCR 反应器，布置在余热发电 PH 锅炉外侧场地，与 PH 锅炉风管互不干涉，且便于回风管道接入 PH 锅炉和 SCR 反应器底部回灰。



▲ SCR 反应器流程框图

(三) 改造氨水系统

SCR 系统采用 20%氨水作为还原剂，通过压缩空气雾化喷入预热器 C1 旋风筒进风管道，与烟气充分混合后进入 SCR 反应器。氨水接收及储存设施利用生产线 SNCR 系统已有配套设施进行改造，每套 SCR 反应器系统新增 2 套至预热器顶部

的氨水泵送系统及 4 套氨水喷枪。

（四）改造回灰系统

SCR 反应器底部集灰斗出口配置回灰拉链机，将排出的空灰输送至现有 PH 锅炉回灰拉链机，单台拉链机输送能力约 80 吨/小时。拉链机下料口配置手动闸板阀+回转式卸料器，防止系统漏风并满足回转阀故障时设备检修需要。

三、推广价值

与 SNCR 技术相比，SCR 脱硝技术具有显著优势，脱硝效率高达 90%，有效提高氨的反应效率，实现 50 毫克/标准立方米以下的超低排放，大大降低氨逃逸率，减少污染物排放量，实现高效、低耗的经济运行。

13

窑尾 SCR 脱硝系统技改减排



一、基本情况

四川兰丰水泥有限公司窑尾 SCR 脱硝系统技改工程，通过对原有 1#窑窑尾烟气处理系统进行技术改造使 1#生产线废气排放浓度达到国家 A 类排放标准。项目实施后，1#窑尾氮氧化物浓度均值由 80 毫克/立方米降至 45 毫克/方米，对改善区域环境质量具有显著作用。

二、主要做法

（一）评估引进先进技术

综合考虑技术先进性、整体运行维护经济性、施工难易度，选取最合适的 SCR 脱硝技术。采用中低温中尘 SCR 脱硝技术，SCR 反应器布置于高温风机之后，保留 SCR 系统的各项优点的同时，解决了传统 SCR 工艺思路在水泥行业应用上的缺点，对原生产系统影响最小。

（二）以技术应用驱动改造

反应器布置在高温风机之后，设计脱硝系统反应温度区间

为 180—240℃。窑尾烟气经过高温风机后通过进口烟道膨胀节、入口烟气挡板门、导流板进入中低温 SCR 反应器内部进行反应，后经 SCR 出口烟道膨胀节、出口烟气挡板门后进入生料磨前烟道。烟气中的粉尘经声波吹灰器振动，耙式吹灰器吹扫，部分粉尘随着净烟气离开脱硝装置，部分粉尘自然沉降至反应器和净烟道下方的灰斗中，由密封型输灰器输送至指定位置。

三、推广价值

通过实施窑尾 SCR 脱硝系统技改改造后，窑尾氮氧化物排放浓度从之前的 100 毫克/立方米降至 50 毫克/立方米以下，每年可减排氮氧化物排放 166 吨，具有显著的环境效益，可为水泥行业超低排放改造提供技术路径。

14

窑系统自还原脱硝升级改造



一、基本情况

宜宾瑞兴实业有限公司窑系统自还原脱硝升级改造于2023年12月开工建设，2024年3月建成投运。自还原脱硝工艺是国内外普遍使用的水泥脱硝深度治理技术，是在现有预热器基础上增加副框架，利用水泥窑尾增设一套无限还原的脱氮装置。通过该技术应用，窑尾烟气氮氧化物排放在50毫克/标准立方米以内，且后期不增加脱硝成本，不产生二次污染。

二、主要做法

（一）新增自脱硝还原脱氮炉

在原有的窑尾喂料室和分解炉之间新增自脱硝还原脱氮炉。窑尾烟室的气体不直接进入分解炉，需先通过新增设的脱氮炉，再进入分解炉，使熟料煅烧产生的氮氧化物在脱氮炉中进行一系列化学反应，尽可能使其还原到趋近于零。

（二）改造重要环节连接结构

为使新增脱氮炉连接分解炉，局部技改分解炉和窑尾喂料

室的连接结构。新增脱氮炉设置在预热器框架外，并延伸至预热器四层框架。



▲自还原脱硝系统

（三）采用多点煤粉喂煤

将原有的煤粉入炉喂煤方式，改为多点喂煤入炉方式。其中，脱氮炉四路、主炉三路。

三、推广价值

自还原脱硝技术是国家推荐技术，具有一次性投入低、后期运行成本低、不产生危废等优点。窑系统自还原脱硝工艺路径相对具备提高煤炭燃尽率的优势，自脱硝系统投用后，尾煤燃烧更完全，标煤耗下降 2.5 千克/吨熟料以上，每年可节约标煤 4000 吨左右，节约用煤成本约 360 万元、氨水成本 48 万元，显著减少了碳排放。

致 谢

《四川省水泥行业减污降碳优良实践案例》征集和编写过程中，得到四川省生态环境厅应对气候变化与对外合作处、四川省节能低碳协会、德国国际合作机构等的支持。在此，特致感谢！

四川省环境政策研究与规划院

四川省生态环境厅直属公益二类事业单位，主要承担环境政策、环境功能规划、水功能区划、排污口设置、节能和应对气候变化、农村环境保护等方面的研究和技术支撑工作。牵头成立省委智库办批复的四川省长江黄河上游生态屏障建设研究智库，主要开展美丽四川、生态环境保护、应对气候变化等规划政策研究。

四川省水泥协会

由水泥行业上下游企业自愿组成的行业性社团组织，主要职责包括：宣贯国家和四川省水泥行业发展方针、政策，承办政府委托事务，调查研究提出工作建议；推广行业新技术、新装备、管理创新等方面成果与经验；维护行业合法、公平竞争的秩序，组织订立行规、行约，建设行业自律机制和行业企业文化；协调服务行业，开展技术咨询，维护合法权益，实现资源共享。

天府永兴实验室减污降碳评估研究中心

天府永兴实验室作为省政府批复建设的天府实验室之一，是开展绿色低碳领域关键核心技术研究的核心平台。减污降碳评估研究中心由北京大学、中国环境科学研究院、中国科学院空天信息创新研究院、中国科学院过程工程研究所、中国气象科学研究院、四川省环境政策研究与规划院、成都市环境保护科学研究院等单位专家参与建设，主要开展减污降碳协同政策、模型体系等原创性科学研究和集成。

