

附件

水泥行业绿色低碳发展技术指南 (2026 版)

目录

前 言	1
一、窑炉节能减排技术	2
(一) 窑头使用节能型低氮燃烧器	2
(二) 水泥炉窑富氧燃烧节能减排技术	2
(三) 水泥窑窑衬系统模块化装配式集成节能技术	2
二、预热器及篦冷机节能减排技术	3
(一) 预热器分离效率提升及降阻优化技术	3
(二) 预热器及预分解系统升级改造	3
(三) 冷却机升级换代(更换第四代中置辊破篦冷机)	4
(四) 冷却机中置辊破技术	4
三、制备系统改造和用电设备能效提升	5
(一) 生料辊压机终粉磨技术	5
(二) 水泥立磨终粉磨技术及装备	5
(三) 风扫煤磨系统增产节能改造	5
(四) 风机效率提升技术	6
(五) 更换高效电机	7
(六) 电机变频改造	7
(七) 空压机能效提升	7
四、降碳减污协同增效技术	7
(一) 替代燃料协同处置技术	7
(二) 原料配料助剂使用	8
(三) 原料替代	8
(四) 分解炉自脱硝及扩容优化技术	8
(五) 低碳水泥研发及推广	9
(六) 水泥用活化铝硅酸盐胶凝材料制备关键技术	9
(七) 新能源替代技术	10
五、数字化智能化技术	10
(一) 水泥低碳制造智能化关键技术	10

六、前沿技术.....	12
(一) 超临界 CO ₂ 发电技术.....	12
(二) 绿色氢能煅烧水泥熟料关键技术.....	13
(三) 水泥窑炉烟气二氧化碳捕集技术.....	13

前 言

水泥行业是国民经济的重要基础产业，是改善人居环境、发展循环经济的重要支撑，是工业经济稳增长的重要力量。当前，水泥行业市场需求不振，结构性问题突出，行业稳增长任务艰巨。

为更好推进工业领域设备更新和技术改造，促进我省水泥工业领域高端化、智能化、绿色化，优化水泥行业能源结构，加快清洁能源应用，推动并提高替代燃料使用等，鼓励水泥企业利用自有设施、场地进行分布式光伏、风能发电，提高绿电利用比例。建设绿色工厂，推动水泥等行业开展超低排放改造。根据《国家工业和信息化领域节能降碳技术应用指南与案例（2025年版）》《<国家工业节能降碳技术应用指南与案例（2024年版）>之四：建材行业节能降碳技术》《建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录（2023年本）》等参考文件，结合广东省水泥行业发展实际，制定本目录。

本指南共6部分、25项绿色低碳技术。1-5部分为绿色先进适用技术，涵盖资源能源利用率高、污染物排放少、经济效益好、成熟可靠、适宜推广应用的技术，其中第4部分为降碳减污协同增效技术；第5部分为全厂数字化控制技术；第6部分为前沿技术，涵盖业内广泛关注、有一定研究基础、符合行业绿色低碳发展方向，但在关键领域攻关或推广应用中仍存在一定难题的技术。

一、窑炉节能减排技术

(一) 窑头使用节能型低氮燃烧器

适用范围：适用于建材行业水泥熟料烧成工序节能技术改造。

技术特点：采用非金属材质拢焰罩结构，在直流外净风通道外设有“非金属材质拢焰罩”。四个风通道截面积均可进行无级调节，实现各通道风速和风量之间匹配，解决燃烧器控制窑内工况弱的问题，提高煤粉燃尽率，提供喷煤管节能低氮效果，实现窑内过剩空气系数低工况下稳定燃烧。

应用效果：能耗降低 5+ 千克标准煤/吨熟料；窑尾烟室氮氧化物浓度 $\leq 0.06\%$ ；净风工作压力 32~34 千帕。

(二) 水泥炉窑富氧燃烧节能减排技术

适用范围：适用于水泥炉窑生产，尤其适用于采用低热值燃料、替代燃料的工艺。

技术特点：利用吸附剂对特定气体的吸附、脱附能力，吸附空气中的氮气，释放出富氧空气，制氧浓度为 60%~95%。结合水泥炉窑煅烧工艺，通过窑头一次风、送煤风等路径供氧，实现水泥炉窑的富氧煅烧。从燃烧器送入煤粉，使燃料在富氧中充分燃烧，可提高煅烧火焰温度约 100℃，降低空气过剩系数、排烟量和粉尘量。富氧燃烧还可提高水泥熟料的质量、产量及降低能耗。

应用效果：提高熟料产量 5%~8%，减少煤炭消耗 5~7kg/t 熟料，减少 CO₂ 排放量 13kg/t 熟料。

(三) 水泥窑窑衬系统模块化装配式集成节能技术

适用范围：水泥窑炉等高温工业窑炉。

技术特点：采用轻量化低导热系列耐火材料，运用阶梯隔热原理，将耐材高温工作层、安全功能层和气凝胶复合材料层进行模块化集成，实现了多种材料的性能互补和结构功能一体化，降低窑衬重量。预热器及篦冷机内衬采用低导热系数的纳米隔热板代替传统硅酸钙板，回转窑内衬采用低导热系数的复合砖代替传统硅莫砖及高铝砖，或者采用气凝胶隔热材料等新型高效隔热材料，可降低烧成系统热耗。。

应用效果：熟料烧成能耗降低 1~3kgce/t。

二、预热器及篦冷机节能减排技术

（一）预热器分离效率提升及降阻优化技术

适用范围：预热器。

技术特点：更换原有旋风筒蜗壳部分，增大旋风筒进口面积，合理设计蜗壳结构形式，以达到提高旋风筒分离效率、减小旋风筒内切风速和降低系统阻力的目的；采用预热器控制漏风、结皮技术，优化下料管及撒料盒结构，提升物料在预热器进风管道中的分散效果，增强气固换热效率，可大幅降低预热器出口温度和阻力，降低烧成系统热耗和电耗。

应用效果：熟料烧成综合能耗降低 1~2kgce/t。

（二）预热器及预分解系统升级改造

适用范围：预热器。

技术特点：在土建条件允许的情况下，将传统五级预热器增加一级旋风筒变为六级预热器，预热器塔架新增一层楼

面，原有顶级旋风筒上移一层；生料从旋风预热器中通过热气流带动，被逐级加热至 850℃左右，在预分解炉中，约 95% 的碳酸钙分解为氧化钙和二氧化碳，从而减轻了回转窑的负担。通过增加一级换热及提高预热器换热效率、分离效率，从而提升预热器整体的换热效率，降低废气排放热量损失，实现水泥烧成节能减碳。

应用效果：预热器出口气体温度约为 300~350℃；在预分解炉中，碳酸钙的分解率可达到 90%~95%；熟料烧成综合能耗降低 4~5kgce/t。

（三）冷却机升级换代（更换第四代中置辊破篦冷机）

适用范围：篦冷机。

技术特点：该产品位于篦床中间部位，高温热熟料在第一段篦床冷却后，经中置辊式破碎机破碎成小于 25 mm 的颗粒，再由第二段篦床二次冷却。此种结构冷却机熟料冷却效果好，用风量更少。具有高热回收率、高输送效率和高运转率，超低磨损的特点。

应用效果：单位篦面积产量 42-46t/（m²·d）；单位冷却风量 1.7-1.9 Nm³/（kg·cl）；热回收效率 ≥75%；出料温度 ≤65℃+环境温度（粒度 ≤25mm）；运转率 ≥99%；电耗 ≤5kW·h/t.cl。

（四）冷却机中置辊破技术

适用范围：冷却机。

技术特点：将锤式破碎机改造为中置辊破形式，提高熟料冷却效果，增加余热发电能力，可提高篦冷机运转率，降

低烧成系统综合能耗。

应用效果：熟料烧成综合能耗降低 0.2~0.5kgce/t。

三、制备系统改造和用电设备能效提升

（一）生料辊压机终粉磨技术

适用范围：水泥行业的生料粉磨工艺

技术特点：辊压机由两根相对旋转的辊子组成，物料在两辊之间受到高压作用而被粉碎，随后经过分级机进行分离，合格的细粉作为产品输出，不合格的粗颗粒则返回辊压机继续粉磨。该技术利用辊压机高压挤压粉碎料层，提高粉磨效率，相比立磨粉末系统更加节电。

应用效果：辊压机压力通常在 50-150MPa 范围内；生料辊压机系统的单位电耗在 20-25kW·h/吨左右，比传统球磨系统节能 30%~50%。

（二）水泥立磨终粉磨技术及装备

适用范围：水泥行业的水泥磨工艺

技术特点：该技术以外循环终粉磨立磨为核心粉磨装备，开发了高压力、低研磨次数的粉磨结构以及比表面积与细度双向控制的选粉结构。同时与高效梯度分选技术匹配，优化了水泥立式辊磨的工艺管道布置，满足了水泥立磨对循环风的工艺需求。该技术具有系统阻力低、磨机运行稳定、成品质量可控等特点。

应用效果：生产能力 200-400t/h；比表面积 >350m²/kg；系统电耗 ≤26kW·h/t。

（三）风扫煤磨系统增产节能改造

适用范围：水泥行业煤磨工艺

技术特点：改造前煤磨系统烘干能力不足、粉磨能力不足、系统用风量和磨机结构存在问题，通过改造加以改善。改造工作主要分两部分：一是工艺系统的完善与改进；二是煤磨内部改造。工艺系统的完善与改进包括：通过重新更换管道保温层材质并加强保温，增加磨头锁风以减少冷风漏入；调整煤磨仓长结构，对煤磨烘干仓和粉磨仓的长度比进行重新分配，并在磨内增加了有利于磨内研磨体运动强度的活化衬板和磨头锁风装置；针对煤磨和选粉机的用风量进行重新计算，以满足各自的需要，改造中通过设置旁路风管来实现磨机、选粉机的不同用风量需求，可向选粉机补充一定的温度气体，还可以确保进入煤磨袋收尘的废气温度，有利于系统正常稳定运行。煤磨内部改造主要是针对仓位、隔仓板、研磨体级配等进行调整，即：拆除原有隔仓板，同时拆除烘干仓内 1m 的扬料板，以缩短烘干仓、延长粉磨仓。在距离磨头 2m 位置重新安装隔仓板，同时在移除扬料板的位置铺设阶梯衬板。因隔仓板位置正好位于磨头人孔门中间，故封闭此人孔，检修时可从磨头进料口进入。

应用效果：风扫磨磨内采用低通风阻力的配件和合理的研磨体级配等技改路线，可达到增产 15%、节电 16% 的效果。

（四）风机效率提升技术

适用范围：水泥行业风机设备。

技术特点：随着风机整体节能技术的进步，水泥工业使用高效风机、新型悬浮风机、永磁电机（低负荷运行时）、

高效联轴器等节能通用设备能够起到很好的节电效果，包括窑头风机、窑尾风机、原料磨/水泥磨循环风机、均化库风机等。近年来节能风机技术开始广泛应用，能够实现节能30%~40%，噪声由120dB降到80dB。

应用效果：风机效率达到82%~85%，实现节能30%~40%。

（五）更换高效电机

适用范围：全厂用电设备，如风机、磨机等。

技术特点：随着电机整体节能技术的进步，将传统电机更换为永磁同步电机。

应用效果：节电率15~20%以上。

（六）电机变频改造

适用范围：全厂用电设备。

技术特点：对用电负荷波动较大的用电设备的拖动电机进行变频改造。

应用效果：节电率10%以上。

（七）空压机能效提升

适用范围：空压机。

技术特点：将烧成车间、粉磨车间、制成车间等的空压机更换为高效节能变频空压机。

应用效果：节电率20%以上。

四、降碳减污协同增效技术

（一）替代燃料协同处置技术

适用范围：水泥回转窑。

技术特点：将满足或经过预处理后满足入窑要求的生物质垃圾、生活垃圾等固体废物投入水泥窑，在进行水泥熟料生产的同时实现对废物的无害化处置。

应用效果：生活垃圾、污泥、生物质等可燃物替代在水泥窑系统中实现 20% 以上的热值替代率；原料替代率 10% 以上产品和能耗满足相关标准。

（二）原料配料助剂使用

适用范围：水泥生产原料。

技术特点：主要包括两个方面，一是生料掺烧节煤剂和生料助磨剂。在生料制备阶段掺入一定比例的节煤剂和生料助磨剂，达到大幅度地降低熟料烧成热耗，提高熟料产质量，改善生产环境的效果。二是原料掺和矿化剂。通过原料提高矿化剂比例，可使生料易烧性改善、并加速化合物结晶，提高节能减碳效果。

应用效果：熟料烧成综合能耗降低 1~2kgce/t。

（三）原料替代

适用范围：水泥生产原料。

技术特点：采用包括电石渣、磷石膏、氟石膏、锰渣、赤泥、钢渣、镁渣及市政污泥等工业废渣废弃物，替代石灰石等作为水泥生产用原料，通过含钙固体废弃物资源综合利用，节约大量的天然矿产资源，降低天然原料的消耗，有效减少水泥生产工艺过程的二氧化碳排放。

应用效果：降低石灰石等原料消耗。

（四）分解炉自脱硝及扩容优化技术

适用范围：水泥分解炉。

技术特点：增大原有分解炉炉容，优化进入分解炉的三次风、尾煤及入炉物料下料点位置，创造分解炉自脱硝还原区，改善分解炉内煤粉的燃烧及生料分解，提高煤粉燃尽率和生料的分解率，从而降低烧成系统热耗和提高分解炉自脱硝效率。

应用效果：熟料烧成综合能耗降低 1~3kgce/t，减少氨水用量 30%~50%。

（五）低碳水泥研发及推广

适用范围：使用相应的水泥产品质量标准的行业。

技术特点：该产品主要包括两个方向。一是突破现有硅酸盐水泥熟料矿物组成的限制，采用含钙较少的水泥熟料矿物体系，提高低钙矿物含量，减少碳酸钙用量，从而减少 CO₂ 排放，如高贝利特水泥。二是创新水泥熟料矿物体系，采用非硅酸盐水泥熟料体系，引入其他低钙或不含钙的矿物组分，减少碳酸钙用量，从而减少 CO₂ 排放，如硫（铁）铝酸盐水泥、LC3 水泥等。

应用效果：减少高碳水泥的使用，减少 CO₂ 排放。

（六）水泥用活化铝硅酸盐胶凝材料制备关键技术

适用范围：水泥行业活化铝硅酸盐胶凝材料制备领域。

技术特点：该技术采用回转煅烧与原水泥产线耦合工艺，利用水泥窑炉余热及三次热风低温（800 °C 左右）将高岭土煅烧为无定型活性偏高岭土，制备水泥用活化铝硅酸盐胶凝材料，可替代 30%水泥熟料生产水泥，不增加废气处理系统，

煅烧工艺相比 1450℃水泥熟料高温工艺能耗降低 35%，碳排放降低 40%。

应用效果：采用 750~800℃低温活化工艺，相比 1450℃熟料高温工艺能耗降低 35%；通过燃料替代与能源循环技术深度融合，构建燃料替代率达 100%的低碳煅烧装备群，煅烧热耗降低 35%。

（七）新能源替代技术

适用范围：水泥厂闲置空地。

技术特点：利用水泥厂的自然环境和地理位置，使用风电、光电技术、风光储技术，吸收工业领域新能源技术探索经验，通过绿色能源技术途径减少水泥生产过程中的电力消耗，结合余热发电，改造现有水泥厂使其实现“零购电”或“近零购电”，促进水泥生产的绿色能源低碳转型。

应用效果：增加 1MW 新能源发电项目，则年发电量约 100~120 万 kW·h。

五、数字化智能化技术

（一）水泥低碳制造智能化关键技术

适用范围：适用于水泥行业。

技术特点：围绕构建智能装备、智能生产、智能运维、智能运营、智能决策等五大维度，打造“数据、算力、算法、场景和全链路”的技术集群，实现水泥生产线层级的生产管控智能决策、自动化专家系统、智能优化控制及自主寻优，整体完成或分步完成四个维度的生产管控智能化平台建设。

（1）智能装备：实现原料自动配料、烧成系统智能优

化控制、出磨生料智能控制，全自动化实验室采样/送样/成分化验等过程全自动完成，石灰石、原煤辅料堆场无人值守，自动调车和自动堆取料、实现堆场数字化管理。

(2) 智能生产：从石灰石破碎、原料磨、煤磨、脱硫脱硝、熟料发散、辅料原煤堆场均实现无人值守、一键启停、自动控制，各种异常工况均能全自动联锁保护，初步实现烧成系统自寻优控制，完成质量全自动闭环控制，实现智能自动配料，风、煤、料、窑速匹配，生料及窑况稳定性明显增强。

(3) 智能运维：由视频巡检与主辅机振动在线监测、视频监控系統、油品在线监测系统、现场专业巡检融合构建一体化高效智能巡检体系；全自动智能润滑系统；设备巡检、检修、隐患处理通过自动工单流转方式实行闭环管控。

(4) 智能运营：能耗分析过渡为自动取数、自动统计汇总、自动分析、自动能耗异常根源分析，改变数据分析模式，有效提升能耗分析效率、精准性。实现质量一体化管控，打通质量数据、质量管控和智能优化控制链路；安全管理由人工跟踪监管变为信息化多维度防控，中高危区域分级防控，在线验证防护措施及监管到位，实施电力运行安全监控系统。

(5) 智能决策：逐步落地在线热工诊断、生料质量闭环控制、能耗分析及异常定位、在线物料平衡等算法；生产智能控制平台借助“APC+大数据+AI算法”，实现窑况异常工况识别、全局自主寻优、游离氧化钙和28天熟料强度预测；在窑头喂煤控制、篦冷机风量控制及与余热发电经济

平衡控制方面，应用专家 AI 算法优势，进一步兼顾余热发电量、降低吨熟料煤耗。

应用效果：熟料综合电耗降低 1~5kW·h/t，标准煤耗降低 1.0~3.0kgce/t。

六、前沿技术

（一）超临界 CO₂ 发电技术

适用范围：水泥等工业行业发电领域。

技术特点：超临界 CO₂ 发电技术是一种高效的新型发电方式。它利用 CO₂ 在超临界状态下的独特热物理性质，将其用作工质来驱动汽轮机进行发电。CO₂ 在 31℃ 以上和 7.38 兆帕的条件下处于超临界状态，既具备气体的高扩散性，又具备液体的高密度和高导热性。这使得它能够在较低温度和压力下实现高效的热能转换。

应用效果：压力 7.38 兆帕以上（超临界状态）；温度 31℃ 以上（超临界点），实际工艺温度一般为 500-700℃；发电效率可达 45%~50%，比传统水蒸气轮机的效率高出 5%~10%；设备体积超临界 CO₂ 系统的体积约为传统水蒸气发电设备的 1/10。

技术难点：水泥窑的余热资源具有“温度低、波动大、品位复杂”的特点，与超临界 CO₂ 机组的设计工况存在偏差。一是温度区间不符，水泥窑可利用的余热多在 80-400℃，而超临界 CO₂ 高效发电的理想热源为 350-600℃。低温余热（<300℃）发电效率会明显下降。二是工况波动剧烈，窑系统负荷、原料、燃料等变化会导致烟气量和温度频繁波动，

这对超临界 CO₂ 系统维持在临界点附近的精密运行控制提出了极高要求，否则效率会大打折扣。

（二）绿色氢能煨烧水泥熟料关键技术

适用范围：水泥熟料煨烧。

技术特点：绿色氢能煨烧水泥熟料关键技术采用绿色氢能作为煨烧能源，替代传统的化石燃料。工作原理：通过风力、光伏发电和水电的输入，采用高效电解水制备氢气和氧气技术，随后是将氢气和氧化由多射流燃烧器喷入到水泥窑炉中煨烧水泥熟料，排出窑炉的烟气进行水汽和二氧化碳分离，分离的水汽冷凝后返回到电解水槽中进行循环使用，分离的二氧化碳则可采用加氢制备甲醇、或是制备其他工业产品。

应用效果：采用氢能煨烧水泥熟料，可提高能源利用效率，显著降低水泥生产对环境的影响。

技术难点：与生物质燃料相比，氢能在水泥行业应用还处于探索阶段。目前绿氢生产成本较高，大规模长距离储运困难，与水泥生产工艺适配尚需验证优化，行业应用缺乏标准参考。

（三）水泥窑炉烟气二氧化碳捕集技术

适用范围：水泥窑炉烟气。

技术特点：水泥窑烟气去除粉尘等杂质后，到达吸收塔内被吸附剂吸收形成富液，再通过加热析出 95%纯度的二氧化碳，最后精馏出高纯度二氧化碳产品，从而完成碳捕捉，控制碳排放。

应用效果：可将捕集的二氧化碳加工成 99.9% 工业级纯度和 99.99% 食品级纯度的二氧化碳，生产出来的二氧化碳产品可广泛应用于焊接、食品保鲜、干冰生产、激光、医药等领域，真正实现了碳的“变废为宝”。

技术难点：捕集难度大，水泥窑炉烟气成分复杂，二氧化碳浓度波动大，需高效过滤和吸附技术确保捕集率；纯化要求高，捕集后的二氧化碳需通过物理/化学方法脱除杂质（如粉尘、硫化物），达到高纯度标准；催化转化挑战大，催化反应条件苛刻（温度、压力、催化剂活性），需优化工艺以提高转化效率和产物质量；经济投入大，装置投资成本高昂，装置投资成本高昂。