

JC/T XXXX 《水泥窑全氧燃烧技术规范》

（征求意见稿）

编制说明

标准编制组

2026年03月

一、任务来源及编制背景

1.1 任务来源

为深入贯彻落实《中共中央 国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》《2030年前碳达峰行动方案》等国家重大决策部署，加快实施建材行业碳达峰行动，构建绿色低碳技术体系，结合《建材行业碳达峰实施方案》《水泥行业节能降碳专项行动计划》等政策文件要求，“十四五”期间，以水泥、平板玻璃、建筑卫生陶瓷等行业为重点领域，推广应用富氧或全氧燃烧、碳捕集利用与封存等绿色低碳技术，提升行业碳减排水平，构建建材行业绿色低碳制造体系。

根据《工业和信息化部办公厅关于印发2025年第三批行业标准制修订和外文版项目计划的通知》（工信厅科函〔2025〕294号），《水泥窑全氧燃烧技术规范》（2025-0665T-JC）作为行业标准立项，完成年限2026年。由建材工业综合标准化技术委员会归口，编制工作由天津水泥工业设计研究院有限公司，中国建材装备集团等单位承担。

1.2 编制背景

水泥行业碳排放量约占全国碳排放总量的10%，是制造业中主要的二氧化碳排放源之一，实现水泥行业低碳绿色发展对我国总体实现碳达峰目标和碳中和愿景具有决定性作用。工业和信息化部等部门联合印发的《建材行业碳达峰实施方案》，从总量控制、原料替代、用能转换、技术创新、绿色制造五个维度明确了建材行业碳达峰实施路径，提出要重点推广碳捕集等碳汇技术，积极推进碳中和。全氧燃烧技术作为重要的碳减排技术路径，已被列入《建材工业鼓励推广应用的技术和产品目录（2025年本）》。国家发展改革委、工业和信息化部、生态环境部等部门联合印发《水泥行业节能降碳专项行动计划》，明确要求加快推进水泥行业节能降碳改造，推广先进适用技术。与此同时，水泥行业已纳入全国碳排放权交易市场，企业面临切实的碳减排压力，亟需先进适用的低碳技术作为支撑。

近年来，水泥行业全氧燃烧碳捕集技术已在示范项目中取得突破性进展。华润水泥在广西和广东同步开展了碳原位捕集技术研究，构建了燃烧调控-碳富集-节能耦合的多要素协同体系，在封开基地建成10万级碳利用示范工程。2024年，

天津水泥工业设计研究院有限公司于青州中联水泥厂建成了国内外首条、规模最大的水泥行业 20 万吨 CO₂/年全氧燃烧耦合低能耗碳捕集工业示范线，为水泥行业低碳技术的产业化应用提供了重要示范。该示范项目的成功运行，不仅为水泥行业实现“双碳”目标提供了切实可行的技术路径，也为全氧燃烧技术的标准化、规模化推广奠定了坚实的工程实践基础。该项目 2025 年 4 月入选国家发展和改革委员会《绿色低碳先进技术示范项目清单（第二批）》，获批国家工信部《原材料工业 2024 二十大先进适用低碳技术》。

目前，国内尚未发布水泥窑全氧燃烧技术的行业标准，技术应用中存在系统构成不统一、设备选型缺乏依据、性能评价无标可依等问题，制约了该技术的规模化推广。因此，制定《水泥窑全氧燃烧技术规范》行业标准，对系统构成、设备要求、安全环保、性能指标等进行统一规范，具有重要的现实意义。本标准的研制，有助于促进全氧燃烧技术在水泥行业的规模化、标准化、规范化应用，推动建材行业绿色低碳安全高质量发展，助力国家“双碳”目标如期实现。同时，本标准与正在制定的国家标准《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第 11 部分：富氧（全氧）燃烧系统》（计划号 20255346-T-609）保持协调，共同构成水泥行业全氧燃烧技术的标准体系。

1.3 工作简况

2025 年 7 月，工业和信息化部节能与综合利用司下达本标准制定计划（计划号：2025-0665T-JC）。

2025 年 11 月，建材工业综合标准化技术委员会召开了本标准启动会并成立了标准起草组，确定标准制定工作计划。

2025 年 12 月，编制组开展了广泛的行业调研工作。调研范围覆盖国内已建成或正在建设的全氧燃烧碳捕集示范项目以及相关设备制造企业、设计院所和科研机构。

2026 年 3 月，标准起草编制和完善标准草案，形成征求意见稿。

二、编制原则及标准的主要技术内容说明

2.1 标准编制原则

2.1.1 规范性原则

本文件严格按照 GB/T 1.1-2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草，确保文件结构、编写格式、术语使用、编号规则等符合国家标准规范要求。同时，本文件在编制过程中充分遵循《中华人民共和国标准化法》《建材行业标准化管理办法》等相关法律法规的规定，并与《工业和信息化部办公厅关于印发2025年第三批行业标准制修订和外文版项目计划的通知》（工信厅科函〔2025〕294号）中下达的计划任务要求保持一致。

2.1.2 先进性原则

本标准在编制过程中，紧密结合目前国内水泥行业全氧燃烧技术的工程应用现状、装备制造水平、生产运行参数及行业实际需求，同时综合考量水泥窑烟气碳捕集配套技术发展趋势、绿色低碳转型要求及行业技术升级方向。主要考虑：

（1）以推动水泥行业低碳技术进步、规范全氧燃烧技术应用为原则，指标设定具有一定超前性，不仅贴合国内水泥行业全氧燃烧技术的现有实践水平，更对标行业先进应用案例与技术发展方向，引领行业绿色低碳升级；（2）兼顾标准技术要求的可操作性，主要考虑两方面问题：一是国内不同规模水泥企业的生产工艺基础、装备配置能力及技术改造可行性；二是不同水泥生产线因原料燃料特性、窑型规格、生产工况差异带来的全氧燃烧系统适配性现实差异。因此，标准文本确定的技术要求、性能指标及实施规范，是先进性和可操作性的有机结合，既源于水泥窑全氧燃烧技术的工程实践与行业现状，又高于现有通用应用水平，同时具备落地实施的技术可行性和生产适配性。

2.1.3 协调性原则

本标准编制过程中，全面梳理并衔接水泥生产、制氧设备、安全防护、环保排放、节能设计等领域的现行国家标准、行业标准，严格遵循相关标准的技术要求和规范条款，确保本标准与 GB 4915、GB 16780、GB 50295、JB/T 6427、JC/T 465 等现行标准协调一致，无技术冲突，同时结合水泥窑全氧燃烧技术的特殊性补充专项技术要求，对在编的国家标准《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第11部分：富氧（全氧）燃烧系统》（计划号：20255346-T-609）保持了跟踪，确保未来与国家标准框架的协调，形成对现有标准体系的完善和延伸，保证标准的适用性和体系兼容性。

2.2 标准主要技术内容

2.2.1 标准框架

标准正文内容包括：范围、规范性引用文件、术语和定义、基本要求、系统构成、设备与检测以及安全环保。附录 A 描述了供氧系统能耗计算方法。

2.2.2 适用范围

本文件规定了水泥窑全氧燃烧技术的基本要求、系统构成、设备与检测以及安全环保等内容。

本文件适用于新建及技术改造的水泥窑炉全氧燃烧烧成系统的设计和运行。

2.2.3 规范性引用文件

未注明日期的引用文件，其最新版本适用于本文件。

2.2.4 术语和定义

该部分主要规定了全氧燃烧以及循环烟气 2 个术语和定义。

2.2.5 基本要求

1.本条为全氧燃烧系统工艺流程选择的原则性要求。水泥行业实现碳达峰碳中和目标，亟需高效、经济的碳捕集技术。全氧燃烧替代传统空气助燃，可将常规空气助燃下 20%~30%的烟气 CO₂ 浓度升至 80%以上。高浓度 CO₂ 烟气可显著降低后续捕集、压缩、液化的能耗。水泥窑全氧燃烧系统的工艺流程受多种因素影响，包括系统规模、烟气总量、助燃风氧浓度、烟气成分、压力的波动范围、碳捕集产品的去向、场地空间及公用工程条件等。不同项目在上述条件上存在差异，不宜采用统一的固定流程。因此，在综合考虑上述因素的基础上，通过技术与经济比较，选择最优的工艺流程方案，确保系统在满足碳捕集要求的同时，实现投资与运行成本的最优化。

2.本条对全氧燃烧系统的装备规格确定和设计依据作出规定。窑系统产量是确定供氧量、循环烟气量及设备规格的基础；原燃料条件影响燃烧器设计、分解炉温度控制及烟气成分；海拔高度影响风机选型及气体体积流量换算。因此，要求综合这些因素确定装备规格。同时，为确保设备选型设计的规范性，明确引用 GB 50295《水泥工厂设计规范》和 GB 50443《水泥工厂节能设计规范》作为设

计依据，这两项标准是水泥工厂设计的基础性规范，涵盖了设备选型、能效要求等内容。

3.本文件涉及的水泥窑全氧燃烧碳捕集技术，其工艺条件与常规空气助燃存在差异（如烟气中 CO₂ 浓度升高、窑内气氛变化等）。这些工艺变化可能对熟料矿物形成及性能产生影响。引用 GB/T 21372 作为熟料质量的判定依据，能够确保采用全氧燃烧工艺生产的熟料仍满足通用熟料质量要求，保障下游水泥产品的性能稳定。

4.全氧燃烧系统中存在氧气管道、循环烟气管道、压力容器等承压设备，其设计安全性至关重要。GB 51316《有色金属冶炼厂电力设计规范》虽主要针对有色金属冶炼行业，但其关于压力容器、泵、换热器、管道、阀门的设计规定同样适用于本系统的类似设备，特别是氧气介质下的安全设计要求。本条引用该标准，确保承压设备的设计符合国家强制性规范要求，防止因设计缺陷引发安全事故。

5.全氧燃烧技术不同于常规空气助燃，尤其是主燃烧器火焰温度、气氛、热力分布等均发生变化，若设计不当，可能影响熟料质量、窑况稳定及系统安全。因此，要求从工艺参数（助燃风氧浓度、循环烟气比例、温度控制等）、设备选型（燃烧器、分解炉、冷却机等）、系统集成（各子系统协调运行）及安全控制（联锁、监测等）四个维度进行综合设计。特别强调全氧燃烧系统不应干扰水泥窑原有的烧成制度，这是全氧燃烧技术能够在水泥行业推广应用的基本前提。

6.全氧燃烧工况下，窑内火焰温度升高、氧浓度增加，对耐火材料的抗热震性、抗侵蚀性及高温强度提出更高要求。JC/T 2196《水泥回转窑用耐火材料使用规程》是水泥行业耐火材料设计、施工、验收及维护的权威依据，涵盖了材料选型、砌筑工艺、烘窑制度等内容。本条引用该标准，确保全氧燃烧系统的耐火材料工程符合行业规范，避免因耐火材料失效导致停窑事故。

7.本条体现了全氧燃烧技术推广应用中的工程实用性原则。对于新建生产线，全氧燃烧系统应与空气助燃系统同步设计，以便在制氧设备检修、故障或碳捕集需求降低时，切换回常规空气助燃模式，保证熟料连续生产。对于现有生产线改造，由于全氧燃烧系统是在原有空气助燃系统基础上增加，必须保留原有助燃能力，并实现两种工况的平稳切换。这一要求基于青州中联等示范项目的运行经验，

实际验证了双模式切换的技术可行性。

8.本条是保障全氧燃烧系统安全运行的关键措施。全氧燃烧工况下，助燃介质中氧气浓度高（ $\geq 93\%$ ），若发生火焰熄灭而氧气继续喷入，可能造成可燃气体体积聚，再次点火时引发爆燃事故。因此，要求设置火焰监测装置实时检测燃烧状态，一旦检测到火焰熄灭，联锁系统应立即切断氧气供应。同时，氧气浓度监测用于确保供氧系统输出稳定，防止浓度异常影响燃烧或引发安全风险。

9.水泥窑预热器、分解炉、烟室等部位在常规空气助燃工况下就易发生结皮堵塞，全氧燃烧工况下由于系统固气比改变、系统风量减小、可能存在局部高温区等原因，结皮堵塞风险可能进一步增加。结皮堵塞会影响系统通风、增加能耗，严重时导致停产。因此，要求在易结皮部位（如弯头、下料管、锥体、缩口等）预先设置清堵装置（如空气炮、振打装置等），以便在结皮发生时及时清理，保障系统连续稳定运行。

2.2.5 系统构成

2.2.5.1 基本构成

水泥烧成全氧燃烧系统是通过引入供氧系统、循环烟气系统，并对燃烧器、分解炉、回转窑、冷却机等核心设备进行适应性改造而形成的全新工艺系统，为设计和运行单位提供清晰的系统边界和设备范围。

与常规水泥烧成系统相比，全氧燃烧系统的主要变化体现在以下三个方面：

（1）助燃介质由空气变为高纯度氧气与循环烟气的混合气体，因此需要增设供氧系统和循环烟气取气、输送、分配、调节装置。

（2）核心燃烧设备需适应全氧燃烧工况，包括燃烧器、分解炉、回转窑、冷却机等，这些设备在常规系统基础上增加了氧气/循环烟气接口、密封结构、耐高温材料等特殊要求。

（3）系统密封性要求显著提高，因为任何空气漏入都会稀释烟气 CO_2 浓度，影响碳捕集成本和效率。因此，预热设备、高温风机、烟气处理设备等的密封堵漏成为系统构成的关键环节。

2.2.5.2 系统性能

1. 全氧燃烧技术作为水泥行业碳捕集的重要技术路径，其推广应用必须建立

在技术成熟、安全可靠、经济可行的基础之上。GB 16780《水泥单位产品能源消耗限额》这是水泥行业能效管理的核心标准，规定了水泥单位产品综合能耗的限额等级。全氧燃烧系统的引入不应以牺牲能效为代价，其烧成系统单位产品能耗必须满足该标准的要求。青州中联示范项目实测熟料综合能耗 98.68 kg/t，优于 GB 16780 中现有企业 ≤ 100 kg/t 的限额要求，验证了全氧燃烧技术在能耗控制方面的可行性。GB 4915《水泥工业大气污染物排放标准》是水泥行业大气污染物排放的强制性标准，规定了颗粒物、SO₂、NO_x、氨等污染物的排放限值。全氧燃烧系统虽然改变了助燃介质，但仍需满足相同的环保排放要求。青州中联示范项目实测值均优于 GB 4915 限值，验证了全氧燃烧技术在减污方面的协同效益。

2.系统的主要性能指标

表 1 系统的主要性能指标

| 指标名称 | | 参数值 | 备注 |
|------------------------------|------------|---------------------|-----------|
| 出全氧燃烧系统烟气 CO ₂ 浓度 | | $\geq 80\%$ | 干基，体积分数 |
| 能耗 | 供氧系统能耗 | ≤ 0.25 GJ/t.cl | 计算公式见附录 A |
| | 全氧燃烧系统综合能耗 | 符合 GB/T 16780 的规定 | / |
| 入窑物料表观分解率 | | $\geq 90\%$ | / |

(1) 将出全氧燃烧系统烟气 CO₂ 浓度指标设定为 $\geq 80\%$ ，主要基于青州中联示范项目长期运行考核实测尾排风机出口烟气 CO₂ 干基浓度为 81.5%。将指标设定为 $\geq 80\%$ ，既反映了当前全氧燃烧技术的实际可达水平，也为碳捕集环节提供了高质量的气源条件。该指标取值科学合理，具备充分的技术可行性和工程实践基础。

(2) 全氧燃烧系统的能耗包括燃料燃烧热耗和动力设备电耗。供氧系统电耗是新增电耗的主要部分，单独考核有助于识别节能潜力。通过设定能耗限值，引导设计单位选用高效制氧工艺，如深冷空分、变压吸附以及膜分离等先进技术，降低制氧电耗，供氧系统能耗可与行业先进水平进行对比，为技术改进提供依据。

全氧燃烧技术的经济可行性很大程度上取决于制氧能耗。根据典型示范项目的实际运行数据，采用变压吸附制氧设备（JB/T 6427）时，供氧电耗约为 0.335 kWh/Nm³ O₂，折合约 0.377 GJ/t.CO₂。结合熟料产量与 CO₂ 捕集量的对应关系，折算为吨熟料供氧能耗约为 0.23~0.25 GJ/t.cl。

(3) 全氧燃烧工况下，分解炉内 CO₂ 浓度显著升高，高浓度 CO₂ 气氛对碳

酸盐分解反应产生抑制作用。因此，有必要对入窑物料表观分解率提出明确要求，确保全氧燃烧分解炉在设计合理的前提下，既满足常规烧成系统生料分解率要求又能够达到全氧燃烧工况下与常规分解炉相当甚至更优的分解效果。在新型干法水泥生产线上，分解炉炉容普遍比较充足，入窑生料分解率一般控制在 90%~95% 之间。如果分解率低于 90%，未分解的生料进入回转窑后，所需分解热量将由回转窑提供，会显著增加窑的热负荷，影响熟料质量和系统热效率。设定入窑物料表观分解率 $\geq 90\%$ ，既符合新型干法水泥生产的基本工艺要求，也考虑了全氧燃烧条件下生料分解的特性。该指标取值合理，是保证烧成系统高效稳定运行的基本条件。

2.2.6 设备与检测

2.2.6.1 供氧系统

1. 供氧系统是全氧燃烧技术的核心新增系统，其工艺选择直接影响系统投资、运行成本和可靠性。深冷空分适用于大规模、高纯度（ $\geq 99.6\%$ ）氧气需求；变压吸附适用于中等规模、纯度 90%~95% 的氧气需求；膜分离适用于小规模、低纯度需求。本条要求设计方根据项目规模、纯度要求和投资条件进行技术经济比选，体现了因地制宜的原则。青州中联示范项目采用深冷空分工艺，制氧纯度 93.88%，电耗 0.335 kWh/Nm³，验证了变压吸附在大规模全氧燃烧项目中的适用性。同时，华润开封 10 万吨碳捕集项目采用深冷空分工艺，

2. 深冷空分涉及低温液化气体及制冷剂，存在低温冻伤、窒息、火灾等安全风险。GB/T 35528《低温液化气体安全指南》规定了低温液化气体的安全管理要求，包括储存、运输、操作、防护等。本条引用该标准，确保深冷制氧系统的安全运行，防止安全事故。

3. JB/T 6427《变压吸附制氧设备》是变压吸附制氧设备的行业标准，规定了设备的技术要求、试验方法、检验规则等。本条引用该标准，确保 PSA 制氧设备的选型、制造和验收有标可依。

4. 氧气纯度直接影响全氧燃烧效果，制氧气体中除 O₂ 外的外源气体含量增加，会使 CO₂ 富集效果下降，将纯度设定为 $\geq 93\%$ ，是综合考虑制氧能耗（纯度越高能耗越大）和燃烧效果后的平衡值。工业氧气纯度供应波动过大会导致火焰不稳定，影响烧成系统甚至碳捕集系统的稳定运行，压力波动 $\leq \pm 2\%$ 的要求参考

了 GB/T 36227《特大型空气分离设备》对产品气纯度波动的规定。

5. 供氧系统是关系燃烧安全和碳捕集效率的关键环节。流量监测用于计量氧气消耗量，为能耗核算提供数据；压力监测用于判断管道是否泄漏或堵塞；温度监测用于评估制氧设备运行状态。这些参数是自动控制系统和安全联锁的基础输入，因此要求设置相应监测设施。

6. 氧气管道属于高风险管道，其设计、选材、施工和验收必须严格遵循国家强制性规范。GB 50030《氧气站设计规范》规定了氧气站及氧气管道的设计要求，包括管道材质、流速限制、静电接地、脱脂要求等。GB 50316《工业金属管道设计规范》是工业管道的通用设计规范，其第 14.6 条对氧气管道有专门规定。本条引用两项标准，确保氧气管道从设计到验收的全流程安全可控。

7. 深冷制氧系统中，低温设备及管道（如液氧、液氮管路）若不采取保冷措施，会造成冷量损失、能耗增加，同时外壁凝露可能导致设备腐蚀、地面湿滑等安全隐患。

8. GB 50264《工业设备及管道绝热工程设计规范》是绝热工程设计的基础标准，规定了绝热层厚度的计算方法、材料选择、经济厚度确定等。本条引用该标准，确保保温保冷层设计科学、经济、合理。

9. 供氧系统中存在压力容器、泵、换热器、管道、阀门等承压设备，其设计安全性是保障系统安全运行的基础。GB/T 150《压力容器》是压力容器设计的通用国家标准，规定了压力容器的材料、设计、制造、检验和验收要求，适用于各类工业压力容器。同时，工业金属管道的设计应符合 GB 50316《工业金属管道设计规范》的规定。

2.2.6.2 全氧燃烧燃烧器

1. GB 50295《水泥工厂设计规范》对燃烧器的选型、布置有总体要求；JC/T 938《水泥工业用多通道煤粉燃烧器技术条件》是燃烧器产品的行业标准，规定了燃烧器的结构、性能、试验方法等。本条引用这两项标准，确保全氧燃烧燃烧器在满足常规水泥工厂设计要求和产品标准的基础上，再附加全氧燃烧专用要求。

2. 为保证系统运行灵活性，在制氧设备或碳捕集设备检修或故障时能够无缝切换回空气助燃模式，燃烧器必须具备双模式切换能力。这是全氧燃烧技术从示范走向工业化的基本要求。青州中联项目验证了切换操作的可行性，本条将该实

践经验上升为标准要求。

3.全氧燃烧火焰特性与空气助燃有显著差异，且不同燃料对火焰的要求不同。燃烧器必须具备调节能力，以适应燃料变化和工况调整，防止火焰冲刷窑皮或造成局部过热。

4.全氧燃烧并非直接使用纯氧，而是将氧气与循环烟气混合后使用，主要原因：一是降低火焰峰值温度，抑制热力型 NO_x 生成；二是利用循环烟气中的 CO₂ 调节燃烧氛围。

5.窑头罩是系统漏风的重点部位之一。若燃烧器与窑头罩连接处密封不严，空气漏入系统会稀释烟气 CO₂ 浓度，影响碳捕集效率。要求密封装置便于检修和更换，是考虑到密封件属于易损件，需要定期维护。

6.全氧燃烧器在冷态启动时需要点火装置，喷油点火装置是成熟可靠的点火方式。多通道结构可分别输送燃料、氧气、循环烟气，便于独立调节。头部内衬采用抗热震耐磨材料，是因为全氧燃烧火焰温度高、热应力大，普通浇注料易开裂剥落。

2.2.6.3 全氧燃烧分解炉

1.本条引用该标准，确保全氧燃烧分解炉在满足常规分解炉技术要求的基础上，再附加全氧燃烧专用要求。

2.分解炉是全氧燃烧系统的核心设备之一，其内部同时发生燃料燃烧和生料分解。氧气和循环烟气的喷入位置直接影响炉内温度分布和燃烧效率。若喷入点不当，可能造成局部过热、NO_x 激增或燃料不完全燃烧。因此，要确定最佳位置和数量对装备进行开发设计。

3.分解炉本体及附属部件的任何漏点都会导致空气进入，稀释烟气 CO₂ 浓度。本条详细列举了容易漏风的部位，指导设计、施工和运行单位全面排查密封点。

4.分解炉出口烟气成分是判断燃烧效率和分解效果的关键指标。CO 浓度反映燃烧完全程度，CO₂ 浓度反映富集效果，O₂ 浓度反映系统漏风情况。要求量程为 0%-100%，是因为全氧燃烧工况下 CO₂ 浓度可达 80%以上，普通量程无法满足测量需求。

5.主燃烧器相对常规燃烧工况会增加热力型 NO_x 的形成。采用低氮型分解炉可降低 NO_x 生成，减轻脱硝装置负担。

6.全氧燃烧工况下烟气温度的升高，结皮风险增加。微晶板和碳化硅材料具有表面光滑、不易挂料、抗化学侵蚀等特点，可有效减少结皮。本条推荐在弯头、锥体、缩口等易结皮部位采用这些材料。

2.2.6.4 全氧燃烧回转窑

1.本条引用该标准，确保全氧燃烧回转窑在满足常规回转窑技术要求的基础上，再附加全氧燃烧专用要求。

2.回转窑窑头、窑尾是系统漏风的主要部位。常规的迷宫密封或鱼鳞片密封难以满足全氧燃烧对低漏风率的要求。采用循环烟气作为正压密封介质，可在密封处形成气幕，有效阻隔空气进入。

3.全氧燃烧火焰温度升高，筒体热负荷增加。设置筒体温度检测装置（如红外扫描仪或热电偶）可实时监测筒体温度分布，防止筒体超温导致变形或损坏。本条是保障回转窑安全运行的基本要求。

4.窑尾烟室烟气成分反映窑内燃烧状况。设置气体分析仪监测 CO、CO₂、O₂、NO_x 等，为燃烧控制提供依据，特别是判断是否存在不完全燃烧或漏风。

5.全氧燃烧工况下，烧成带火焰温度升高会较常规工况有所提升，对耐火材料的抗侵蚀性、抗剥落性提出更高要求。本条强调耐火材料必须适应全氧燃烧工况，保障窑衬寿命。

2.2.6.5 全氧燃烧冷却机

1.GB 50295《水泥工厂设计规范》对冷却机的选型、布置有总体要求。本条引用该标准，确保冷却机设计符合水泥工厂设计规范。

2.全氧燃烧工况下，窑头火焰温度升高，熟料温度可能升高，大块熟料增多。中置辊式破碎机可有效破碎大块熟料，提高冷却效率。推荐采用中置辊破，是对全氧燃烧工况的适应性要求。

3.冷却机是系统漏风的另一重点部位。若冷却机密封不严，大量空气会从冷却机经窑头罩进入回转窑，严重稀释烟气 CO₂ 浓度。本条要求采用可靠密封结构，并定期检测漏风，体现了对全系统漏风控制的严格要求。

4.冷却机各段篦床压力平衡是保证冷却风均匀分布、防止空气短路，各风室窜风的关键。维持微负压（如-50~-100 Pa）可防止空气从冷却机壳体缝隙漏入

系统。设置压力检测装置是实现压力平衡和微负压控制的前提。

5.常规冷却机使用空气冷却熟料，这些空气最终进入回转窑，稀释烟气 CO₂ 浓度。采用循环烟气作为冷却介质，可避免引入额外空气，维持系统高 CO₂ 浓度，可根据循环烟气量和经济性决定是否采用。

6.风量、风压测量用于监控冷却风供应情况，为调节篦床速度和冷却风量提供依据。熟料温度测量用于判断冷却效果，防止出冷却机熟料温度过高影响后续输送和储存。

2.2.6.6 预热系统

1.本条引用该标准，确保预热系统满足常规技术要求。

2.预热系统是全氧燃烧系统的重要组成部分，用于回收烟气余热、预热生料，降低系统热耗。本条明确预热系统的功能，并列举常见形式，保持技术开放性。

3.预热系统出口烟气的 CO₂、O₂、NO_x、SO₂ 浓度是环保核算和系统性能评价的重要参数。

4.预热系统由连接管道及设备组成，法兰、人孔门、观察孔等部位众多，是系统漏风的主要来源之一。

5.锁风阀是预热器下料管的关键设备，既要保证物料通过，又要防止气流短路。微动阀密封性能好、动作可靠，轴头无漏风可进一步减少系统漏风。

6.预热系统易发生结皮堵塞，常规清堵装置使用压缩空气。使用压缩空气会将氮气带入系统，稀释烟气 CO₂ 浓度。采用循环烟气作为清堵介质，可避免引入外源气体，维持高 CO₂ 浓度。

2.2.6.7 通风设备

1.JC/T 879《水泥工业用离心通风机技术条件》是水泥行业离心通风机的产品标准。本条引用该标准，确保风机选型符合行业规范。

2.JB/T 8941《一般用途罗茨鼓风机 第1部分：技术条件》是罗茨鼓风机的行业标准。本条引用该标准，确保罗茨鼓风机的选型、制造和验收有标可依。

3.GB 50443-2016《水泥工厂节能设计规范》第 3.1.2 条明确规定窑尾高温风机应采用变频调速装置。全氧燃烧工况下系统风量、风压变化较大，变频调速是节能的必要措施。高温风机效率大于 80%是对能效的基本要求。

4.循环风机、冷却风机等其他风机设置变频调速装置可进一步降低电耗，本条为推荐性要求。

5.风机本体漏风（如轴端密封处）是系统漏风的重要来源。将单台风机本体漏风率控制在 $\leq 0.3\%$ ，是全氧燃烧系统维持高 CO_2 浓度的特殊要求。本条基于青州中联项目的实际验证数据制定。

2.2.6.8 烟气处理设备

1.全氧燃烧系统仍需配置脱硝装置以满足排放限值。同时，烟气中的粉尘、 SO_2 需经除尘和脱硫设备处理。

2.HJ 434 《水泥工业除尘工程技术规范》是除尘系统的行业规范；GB/T 35150.5/.6/.7 是新型干法水泥生产成套装备技术要求中关于除尘、脱硫、脱硝的部分。本条引用这些标准，确保烟气处理设备的设计、运行和维护有标可依。

3.同预热系统，避免使用压缩空气引入氮气，维持系统高 CO_2 浓度。

4.除尘设备，特别是袋式收尘器的本体及进出口管道是系统漏风的重点部位。将漏风率控制在 $\leq 0.5\%$ ，是全系统高 CO_2 浓度的保障措施之一。

2.2.6.9 烟气循环系统

1.循环烟气的分配应根据系统设计灵活确定。送入燃烧器可调节火焰特性；送入分解炉可调节炉内温度和 NO_x 生成；送入冷却机可作为冷却介质，各支路可独立控制，互不干扰。

2.独立支路和调节装置是实现烟气灵活分配的技术手段。调节装置（如阀门、变频风机）应能精确控制各支路的烟气流量和压力。

3.循环烟气中含有水蒸气和 SO_3 ，在低温下会结露形成硫酸，腐蚀管道和设备。全氧燃烧工况下烟气 CO_2 和 H_2O 浓度高，酸露点温度可达 $120\sim 150^\circ\text{C}$ 。本条要求评估结露风险并采取防结露措施，保障系统长期安全运行。

4.循环比例指循环烟气量占烟气总量的体积百分比。比例过低时，烟气 CO_2 浓度提升效果不明显；比例过高时，系统阻力和能耗增加。10%-80%是基于示范项目和国内外研究确定的经验范围，设计单位可根据具体工况优化。

5.循环烟气的成分和压力是调节循环比例的基础参数，在线监测可实现实时调控，保证系统稳定运行。

6.若取气口设在净化设备之前，烟气中的粉尘、SO₂、NO_x 会随循环烟气返回燃烧区，在系统内不断富集，导致设备腐蚀、堵塞和排放超标。本条要求在净化设备之后取气，是保证循环烟气品质的关键措施。

7.当系统切换至空气助燃模式时，循环烟气系统停运，需要引入空气维持燃烧器的供风。设置空气进口及切换装置，可实现两种工况的平稳过渡。

8.循环烟气中含有未燃尽的可燃组分（CO、H₂等），若与氧气在管道内预混，一旦遇到点火源可能发生回火爆炸，要求混合在燃烧设备入口或燃烧区内进行，是保障系统安全的核心要求。

2.2.6.10 系统参数检测与过程控制

1.全氧燃烧系统涉及供氧、循环烟气、燃烧控制、安全联锁等多个复杂子系统，各子系统之间相互耦合，依靠人工操作难以实现精准、及时的调节。设置自动检测及控制系统，是实现系统稳定运行、保障安全、降低能耗的必要手段。自动控制系统应能实时采集关键工艺参数（温度、压力、流量、成分等），通过预设的控制逻辑或先进控制算法，自动调节氧气流量、循环烟气比例、喂料量、风机转速等操作变量，确保系统在空气助燃和全氧燃烧两种工况下均能平稳运行。本条是过程控制的总体要求，为后续具体检测项目和控制措施提供依据。

2.GB/T 35150.2《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第2部分：烧成系统》是水泥烧成系统过程控制的基础标准，规定了生料配料、燃料制备、熟料煅烧等环节的检测与控制要求。全氧燃烧系统虽然改变了助燃介质，但烧成工艺的本质未变，生料化学成分、燃料热值、熟料游离氧化钙等常规控制指标仍需满足行业通用要求。本条引用该标准，确保全氧燃烧系统的过程控制与常规水泥生产协调一致，避免因技术升级而忽视基本的质量控制要求。

3.表中内容规定了全氧燃烧系统关键工艺参数的检测位置、检测项目及检测频率，是自动检测和控制系统的具体化。

4.分解炉出口的连接料管是入窑物料取样分析的最佳位置，可获取代表入窑生料分解率的样品。设置专用取样口，保证样品的代表性和检测结果的准确性。本条为推荐性要求，设计单位应根据实际工艺布置确定取样口位置。

5.本条引用该标准，确保全氧燃烧系统的电气和自动化设计符合水泥行业的通用要求，便于与工厂现有控制系统集成。

6.全氧燃烧系统不宜设置独立的控制系统，而应纳入水泥窑原有的中央控制室系统，与窑系统同步运行、统一调度。这样可以减少操作人员培训成本，便于工况切换时的协同控制，也有利于数据集中管理和故障诊断。

7.本条是对过程监测装置的总体要求，强调必须设置物料流量、气体温度、气体压力及气体成份的监测装置。这些参数是自动控制系统实现闭环调节的基础数据，也是运行人员判断系统状态、进行人工干预的依据。本条的设置确保了表2中各项检测项目有相应的硬件支撑。

2.2.7 安全环保

2.2.7.1 安全

1.GB 50577《水泥工厂职业安全卫生设计规范》是水泥工厂安全设计的强制性标准，涵盖了建筑防火、防爆、防电伤、防雷等安全要求。全氧燃烧系统虽然增加了供氧和循环烟气子系统，但其建筑和电气安全要求仍应在该规范的框架下执行。本条引用该标准，确保全氧燃烧系统的安全设计与水泥工厂整体安全要求协调一致，避免因技术升级而产生安全盲区。

2.本条是全氧燃烧系统最核心的安全要求之一。循环烟气中含有未燃尽的可燃组分，而氧气是强助燃剂。若两者在管道内预混，一旦遇到点火源，可能发生回火爆炸，造成灾难性后果。

3.在煤粉输送系统中，通常使用空气作为输送介质。全氧燃烧工况下，若直接使用高纯氧气输送煤粉，煤粉与氧气在管道内形成爆炸性混合物，一旦产生静电或摩擦火花，极易引发爆炸。因此，必须严禁使用氧气作为燃料输送气。

4.本条是通用的职业安全要求，强调设备布置应充分考虑操作和维修的便利性与安全性。全氧燃烧系统增加了制氧设备、循环烟气管道等设施，设计时应确保这些设备周围有足够的空间供人员通行、操作和检修，通道畅通，照明充足，避免因空间狭窄或视线不良导致人身伤害事故。

5.全氧燃烧工况下，火焰温度升高，部分设备和管道（表面温度可能超过 50℃，人员接触可能造成烫伤。因此，要求在人员可能触及的部位设置隔热层、防护罩或高温警示标识。

6.GB 2894《安全标志及使用导则》规定了安全标志的类型、尺寸、设置位置等要求。全氧燃烧系统涉及高压氧气、高温烟气、转动设备等危险源，应在相

应位置设置“禁止烟火”“当心中毒”“当心烫伤”“氧气管道禁止油脂”等警示标志。本条引用该标准，确保安全标志的设置规范、统一、有效。

7.全氧燃烧系统与水泥窑是一个整体，事故状态下需要联动处置，确保事故发生时能够快速响应、有效处置。

8.GB/T 8196《机械安全 防护装置 固定式和活动式防护装置的设计与制造一般要求》是防护装置的基础标准。本条引用该标准，确保防护装置的设计、制造和安装符合安全要求。

9.确保在任何工况下 NO_x 排放都能满足 GB 4915 的要求。同时，使用氨水或尿素作为还原剂时，氨逃逸也必须控制在标准限值内。

10.冷却机排出的废气中含有熟料粉尘，需经除尘器处理后排放。本条明确要求冷却机除尘器的粉尘排放浓度应符合 GB 4915 的规定，防止因关注主烟气而忽略冷却机废气的污染。

11.本条是设备检修作业的安全操作规范。断电、挂牌、上锁是防止误送电的标准程序；有限空间（如收尘器内部、分解炉内部、管道内部）作业前必须通风置换、检测有害气体（CO、O₂ 等），确认安全后方可进入；在导电容器内使用 12 V 安全电压照明，可防止触电事故。这些要求源于安全生产的普遍实践，在全氧燃烧系统中同样适用。

12.本条强调现场安全管理。护栏和警示牌是防止人员误入危险区域的基本措施；严禁从运转设备底部穿越，是防止机械伤害的常识性规定。全氧燃烧系统新增的设备（如制氧机组、循环风机等）同样应遵守这一原则。

2.2.7.1 环保

1.本条是对全氧燃烧系统环保性能的总括要求。无论是全氧燃烧工况还是空气助燃工况，系统向大气排放的颗粒物、SO₂、NO_x、氨等污染物浓度均不得超过 GB 4915 规定的限值。本条确保全氧燃烧技术不会以牺牲环境质量为代价换取碳减排。

2.全氧燃烧系统新增的制氧设备（空压机、增压机、冷却塔等）和循环风机是强噪声源。GB 12348《工业企业厂界环境噪声排放标准》规定了厂界噪声限值（昼间 65 dB(A)、夜间 55 dB(A)）；GB/T 50087《工业企业噪声控制设计规范》规定了噪声控制设计措施（隔声、消声、减振等）。本条引用这两项标准，

要求对噪声源采取综合治理措施，保护厂界周边环境和操作人员听力健康。

3.全氧燃烧系统中有大量高温、低温设备和管道，绝热设计可减少散热损失、降低能耗。GB/T 4272《设备及管道绝热技术通则》是绝热设计的通用标准，规定了绝热材料选择、厚度计算、施工要求等。本条引用该标准，确保绝热设计科学、经济、安全。

2.2.8 供氧系统能耗计算方法

本条界定了供氧系统能耗的统计边界和统计对象。供氧系统能耗是全氧燃烧系统新增能耗的主要组成部分。统计边界包括：（1）制氧主设备：压缩机、预冷机组、纯化系统、增压机、膨胀机、精馏塔等；（2）辅助设备：循环泵、仪表控制系统、电气系统等与制氧工艺直接相关的辅助能耗；（3）输送设备：氧气增压机、氧气管道。

三、主要验证情况分析

本标准选取了国内已建成投运的水泥窑全氧燃烧碳捕集典型示范项目进行技术验证，包括青州中联 20 万吨/年全氧燃烧碳捕集项目、华润开封 10 万吨/年碳捕集项目，系统收集了全氧燃烧工艺过程中的生产运行数据。验证数据收集范围涵盖全氧燃烧系统、供氧系统、循环烟气系统、预热系统、收尘设备及辅助动力设备等关键环节，收集的生产数据包括：系统平均熟料产量、液态 CO₂ 台时产量、出系统烟气 CO₂ 浓度、熟料单位产品综合能耗、供氧浓度、供氧电耗、入窑物料表观分解率、全系统漏风率、二氧化硫排放、NO_x 排放、粉尘排放、噪声等直接调研的清单数据。

本标准选取了其中最具代表性、运行时间最长、数据最完整的典型示范项目作为核心验证对象。该项目的生产规模、技术路线及运行水平代表了国内当前水泥窑全氧燃烧碳捕集技术的先进水平。同时，编制组通过现场调研、技术交流等方式，补充收集了其余已投运项目的部分关键运行数据。综合来看，验证数据来源覆盖了国内已投运项目的多数，能够客观反映当前行业在该技术领域的整体技术水平与运行实况。生产数据采用企业现场调研与在线监测系统采集相结合的方式获取，数据统计时间周期为 2024 年 2 月至 2024 年 10 月，收集到的燃料消耗与能源消耗数据以声明单位进行核算。各项指标验证情况见表 1。

表 1 水泥窑全氧燃烧主要技术指标验证情况

| 指标名称 | 单位 | 参数/工况 | 备注 |
|--------------------------|----------------------|----------------|---------------------------|
| 系统平均熟料产量 | t/h | 14.65 | |
| 液态 CO ₂ 台时产量 | t/h | 28.42 | |
| 出系统烟气 CO ₂ 浓度 | % | 84.2 | |
| 熟料单位产品综合能耗 | kg.ce/t.cl | 98.6 | |
| 供氧浓度 | % | 93.88 | |
| 供氧电耗 | GJ/t.CO ₂ | 0.377 | 0.335 kWh/Nm ³ |
| 入窑物料表观分解率 | % | 94.2 | |
| 全氧燃烧系统综合能耗 | GJ/t.CO ₂ | 0.5 | |
| 全系统漏风率 | % | 2.42 | |
| 二氧化硫排放 | mg/Nm ³ | 1.5 | |
| NO _x 排放 | mg/Nm ³ | 85 | |
| 粉尘排放 | mg/Nm ³ | 3.5 | |
| 厂界噪音 | dB(A) | 昼间≤56 夜间≤45 | |

本标准所规定的各项主要技术指标，均基于上述实际生产验证数据经统计分析后确定。验证结果表明，标准提出的指标要求与行业当前实际运行水平相符，能够真实反映国内水泥窑全氧燃烧碳捕集技术的可行性与先进性。各项指标的取值科学、合理，具备良好的技术经济可行性，能够为未来该技术的推广应用及行业规范管理提供可靠的技术依据。因此，本标准具有明确的指导意义和可操作性。

四、标准中涉及专利情况

本文件起草过程中没有检索到专利和知识产权问题，如果涉及到专利和知识产权时请使用单位与专利和知识产权方协商，本文件的发布机构不承担识别这些专利的责任。

五、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效果等情况

（一）经济效益、社会效益、产业规模、推广应用、工程应用情况、预期达到的经济、社会效益；

当前我国水泥行业正处于绿色低碳转型的关键阶段，水泥窑全氧燃烧技术作为烟气碳捕集的核心配套技术，已在国内多家大型水泥企业完成中试及工业化示范应用，形成了从供氧系统、燃烧装备、烟气循环系统到碳捕集衔接配套的完整技术体系。制氧设备、专用燃烧器、全氧燃烧水泥窑炉等等核心装备均实现国产化量产，设备稳定性、运行效率已满足工业化生产要求，技术成熟度达到产业化推广条件，且国内水泥行业现有生产线的技术改造基础良好，为全氧燃烧技术的规模化落地提供了坚实的产业支撑。

本标准的制定与推广具备充分的行业需求与实施可行性，一方面，“双碳”目标下水泥行业碳减排任务紧迫，全氧燃烧技术可实现窑炉烟气 CO_2 浓度 $\geq 80\%$ ，为低能耗碳捕集纯化提供高浓度气源，是水泥行业实现深度脱碳的关键技术路径，行业内头部企业及中小水泥企业均存在技术改造与新建应用的迫切需求；另一方面，本标准结合国内水泥生产实际，明确了全氧燃烧系统的设计、建设、运行全流程技术要求，兼顾了不同窑型、不同生产规模企业的适配性，既适用于新建水泥窑炉全氧燃烧系统的设计建设，也可指导现有生产线的技术改造，同时标准要求与现行水泥生产、安全环保、节能降耗等标准协调衔接，企业实施过程中可实现与现有生产体系的无缝融合，推广应用无技术壁垒。中国建筑材料联合会、建材工业综合标准化技术委员会将牵头做好标准宣贯与技术指导，为标准落地提供专业支撑，进一步保障推广应用效果。

从行业整体来看，本标准的实施将推动水泥窑全氧燃烧技术的规模化、规范化应用，助力水泥行业实现低碳转型的同时，实现技术降本、生产提效、产业链增值的多重经济效应，为水泥行业高质量发展提供有力支撑，在国内具备条件的

水泥企业完成全氧燃烧技术改造后，行业整体碳捕集综合成本可降低 25%-30%，单位熟料综合能耗进一步下降，企业经济效益与行业绿色发展效益实现双赢。

(二)本标准指标的技术先进性以及本标准的发布对行业及社会发展的促进作用，即与“宜业尚品造福人类”的相关性。

本标准全面贯彻建材行业“宜业尚品、造福人类”的发展理念，将节能、减排、降碳、资源化利用等绿色发展要求落实到技术规范层面。通过明确水泥窑全氧燃烧的技术指标、运行条件及控制要求，为水泥工业碳捕集技术的规范化设计、建设与运行提供了依据，推动行业从末端治理向源头控制与过程优化转变。

从行业发展层面看，本标准的实施将促进水泥工业碳捕集技术从示范走向规模化应用，提升行业整体碳管理能力与绿色发展水平。从社会发展层面看，水泥工业碳捕集技术的推广，是实现工业领域深度减排的重要路径，对支撑国家“双碳”战略、推动生态文明建设具有积极意义。

六、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况

通过与国外典型中试项目（FLSmidth、欧盟 Cleanker 项目）及国内主流技术方案（空气燃烧+化学吸收法直接捕集）的关键指标对比，本标准涉及的技术优势主要体现在以下方面：

在技术方案上，国外 FLSmidth 与欧盟中试项目分别采用的全氧燃烧与全氧燃烧耦合钙循环技术，均处于中试阶段，规模分别为 0.75 万吨/年与 4 万吨/年；本标准采用的技术方案已实现工业化应用，已知在青州和封开成功运行的示范项目年 CO₂ 捕集规模分别达到 20 万吨和 10 万吨，在规模化与工程化程度上具有明显领先性。

在烟气 CO₂ 浓度方面，本项目预热器出口 CO₂ 浓度达到≥80%，高于欧盟钙循环中试项目的 70%，较空气燃烧+化学吸收法的 20%~30%提升约 3 倍，显著降低了后续碳捕集的分离负荷。在能耗与运行成本方面，本项目 CO₂ 产品综合能耗为 1.6 GJ/t CO₂，相较于国内已工业化的直接后捕集技术（2.3~3.0 GJ/t），能耗降低 40%以上，体现出良好的经济性。

| 对比内容 | 国内外同类技术 | | | 本项目 |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| | FLSmidth中试项目(a*) | 欧盟中试项目(b*) | 直接后捕集项目 | |
| 图示 |  |  |  |  |
| 技术方案 | 全氧燃烧 | 全氧燃烧+钙循环 | 空气燃烧+化学吸收法直接捕集 | 全氧燃烧+碳捕集 |
| 应用阶段 | 中试 | 中试 | 工业化 | 工业化 |
| 规模(万吨/年) | 0.75 | 4 | 5 | 20 |
| 预热器出口烟气CO ₂ 浓度(%) | 66 | 70 | 20~30 | ≥80 |
| 预热器出口温度(°C) | ~210 | ~210 | 310(五级)/260(六级) | 185 |
| CO ₂ 产品综合能耗(GJ/t.CO ₂) | 无碳捕集 | 无碳捕集 | 2.3~3.0 | 1.6 |
| 单位产品运行成本 | 无碳捕集 | 无碳捕集 | 高 | 低 |
| 技术成熟度 | 中 | 中 | 高 | 高 |
| <p>小结:</p> <p>①.国内外首次实现全氧燃烧耦合碳捕集工业化应用。</p> <p>②.本项目实现预热器出口烟气CO₂浓度≥80%，较欧盟钙循环项目提升约10%，较空气燃烧提升3倍。</p> <p>③.与直接后捕集技术相比，本项目单位CO₂产品综合能耗降低40%以上。</p> <p>备注:</p> <p>①.a*数据来源: CCUS Projects at LafargeHolcim Focus on Oxy-combustion</p> <p>②.b*数据来源: Cleanker pilot test results</p> | | | | |

图 1 与国内外同类技术主要参数的比较。

本标准规定了全氧燃烧工艺的烟气成分指标，明确了烟气中粉尘、SO₂、NO_x的控制范围，是根据水泥工业大气污染物排放限额要求及后续碳捕集纯化系统工艺的运行特点提出来的，以在满足水泥窑尾烟气达标排放的同时，确保进入捕集系统的烟气组分稳定、杂质含量可控，降低对变压吸附分离效率及低温精馏系统稳定性的影响。其他相关标准或同类项目未对此类全氧燃烧耦合多级提纯工艺的烟气成分提出综合性约束要求。

本标准聚焦于水泥窑烟气化学吸收法二氧化碳捕集，明确了该特定工艺路线的技术指标与规范要求。相比之下，ISO/TR 27912:2016《Carbon dioxide capture - Carbon dioxide capture systems, technologies and processes》涵盖范围更广，涉及燃烧前捕集、富氧燃烧捕集、燃烧后捕集等多种技术类型，并面向水泥、钢铁、化工等多个工业场景，同时对碳捕集技术的未来发展方向进行了探讨。此外，该

标准在燃煤烟气碳捕集领域，对技术、设备、工艺、管理及评价等方面均制定了相应要求。

本标准与 ISO/TR 27922:2021 《Carbon dioxide capture - Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry》在定位与内容上存在明显差异。后者为技术综述类文件，主要介绍有机胺吸附、变压吸附、膜分离、钙循环、富氧燃烧等各类碳捕集技术的原理与发展现状，分析技术选用的影响因素，并通过案例评估不同技术的经济性，提炼关键绩效指标。其重点在于技术介绍与评价方法讨论，并未对具体工艺路线、选择原则或技术参数作出规范性规定。

七、与现行相关法律、法规、规章及相关标准，特别是强制性标准的协调性

本文件在污染物排放、能源消耗、安全设计等关键领域均与现行强制性国家标准保持协调，未设定低于强制性标准要求的指标。在污染物排放方面，本文件第 8.2.8 条、第 8.3.1 条规定氮氧化物排放、氨逃逸应符合 GB 4915《水泥工业大气污染物排放标准》的规定，与强制性排放限值保持一致。在能源消耗方面，本文件第 6.1.1 条要求烧成系统单位产品能耗应符合 GB 16780《水泥单位产品能源消耗限额》的规定，与强制性能耗限额要求相衔接。在氧气管道安全方面，本文件第 6.2.6 条规定氧气输送管道的设计、选材、施工及验收应符合 GB 50030《氧气站设计规范》和 GB 50316《工业金属管道设计规范》的规定，与氧气安全强制性要求保持一致。在工厂设计与安全卫生方面，本文件多处引用 GB 50295《水泥工厂设计规范》、GB 50443《水泥工厂节能设计规范》和 GB 50577《水泥工厂职业安全卫生设计规范》，与水泥工厂设计及职业安全卫生的强制性要求相衔接。

本文件在设备选型、检测方法、能耗计算、装备成套等方面，与现行推荐性国家标准保持协调。在熟料产品标准方面，本文件表 1 规定熟料物理和化学性能应符合 GB/T 21372《硅酸盐水泥熟料》的规定，与熟料产品标准相衔接。在热工计算方法方面，本文件能耗计算方法参考 GB/T 26281《水泥回转窑热平衡、热效率、综合能耗计算方法》和 GB/T 26282《水泥回转窑热平衡测定方法》，保持方法学一致性。在装备技术要求方面，本文件设备选型与 GB/T 35150.2《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第 2 部分：烧成系统》协调，烟气处理设备要求引用 GB/T 35150.5《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第 5 部分：除尘

系统》、GB/T 35150.6《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第6部分：脱硫系统》和GB/T 35150.7《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第7部分：脱硝系统》，形成完整的成套装备技术体系。在回转窑设备方面，本文件第6.5.1条引用GB/T 32449《水泥工业用回转窑》，与回转窑产品标准协调。在深冷制氧安全方面，本文件第6.2.2条引用GB/T 35528《低温液化气体安全指南》，与深冷制氧安全要求协调。在绝热设计方面，本文件第8.3.3条引用GB/T 4272《设备及管道绝热技术通则》，与绝热设计要求协调。在噪声控制方面，本文件第8.3.2条引用GB/T 50087《工业企业噪声控制设计规范》，与噪声控制设计要求协调。

本文件与正在制定的国家标准《新型干法水泥生产成套装备技术要求 第11部分：富氧（全氧）燃烧系统》（计划号：20255346-T-609）保持协调。该标准作为全氧燃烧系统的装备技术要求，与本文件在技术内容上互为补充，共同构成水泥行业全氧燃烧技术的标准体系。

本文件与建材行业已立项的碳捕集相关行业标准保持协调关系，包括JC/T 2964.1《水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范 第1部分：化学吸收》，JC/T 2935《基于项目的二氧化碳减排量评估技术规范 生产水泥熟料的燃料替代项目》，JC/T 2946《建材行业温室气体排放核查技术规范 水泥生产企业》等。这些标准与本文件共同构成水泥行业碳捕集技术的标准体系。

本标准与现行的法律、法规及相关标准等协调一致、无冲突。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

本标准作为建材行业推荐性标准发布，由建材工业综合标准化技术委员会归口并负责解释和修订归口管理。

十、贯彻标准的要求和措施建议（包括组织措施、技术措施、过度办法、实施日期等）

建议按照标准报批计划确定实施日期。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其它应予说明的事项

无。