

《水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范：变压吸附》

（征求意见稿）

编制说明

《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范：变压吸附》编制组

2026 年 09 月

目 录

一、工作简况	3
1.1 行业发展现状	3
1.2 标准任务来源	5
1.3 标准指定的目的、意义	5
1.4 与相关标准的关系	6
1.5 起草组及工作简况	6
二、标准编制原则	8
2.1 规范性	8
2.2 适用性	9
2.3 先进性	9
2.4 统一性	9
三、标准主要技术内容	10
3.1 范围	10
3.2 规范性引用文件	10
3.3 术语和定义	10
3.4 基本要求	10
3.5 工艺与装备	12
3.6 安全与职业卫生	21
3.6 性能测试	23
3.6 运行维护与管理	23
四、主要验证情况分析	25
4.1 青州中联水泥有限公司年产 20 万吨全氧燃烧富集提纯示范项目	25
五、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明	26
六、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况	26
6.1 产业化情况	26
6.2 推广应用论证	27
6.3 预期达到的经济效益	27
七、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国内外同类标准水平的对比情况，国内外关键指标对比分析或与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况	28
八、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	30
九、重大分歧意见的处理经过和依据	30
十、标准性质的建议说明	30
十一、贯彻标准的要求和措施建议	30
十二、废止现行相关标准的建议	30
十三、其它应予说明的事项	31

一、工作简况

1.1 行业发展现状

随着社会经济的发展、人类活动强度增加及能源消耗持续增长，大量温室气体被排放到大气中。其中二氧化碳（CO₂）是占比最大的温室气体，约占温室气体排放总量的 76%，而人类活动产生的 CO₂ 中约 95% 以上来自化石能源（煤、石油、天然气）的消耗。我国化石能源消费占比仍处高位，根据国家统计局数据，2024 年能源消费总量为 59.6 亿吨标准煤，同比增长 4.3%，煤炭消费占比 53.2%，非化石能源消费占比提升至 19.7%。

化石能源燃烧已成为全球最主要的 CO₂ 排放方式。根据国际能源署（IEA）统计，2024 年全球能源相关 CO₂ 排放量约 378 亿吨，增长 0.8%，增速显著低于全球经济增速（3% 以上）；2024 年中国能源活动相关 CO₂ 排放量约 106.6 亿吨，将于“十五五”中后期实现碳达峰，峰值排放量预计在 108 亿吨以上。CO₂ 排放是导致全球气候变化的最主要人为因素，已成为人类面临的重大环境挑战。

水泥工业是我国国民经济发展的重要基础原材料工业之一，具有能耗高、碳排放强度大的特点。对于水泥行业的碳排放结构而言，约 63% 的二氧化碳排放源于碳酸盐分解，约 35% 来源于燃煤。水泥工艺特点决定了碳减排难度大，面临着非常严峻的挑战。我国典型水泥生产的主要工序包括：生料和煤粉制备、熟料煅烧和水泥粉磨。（1）生料和煤粉的制备。生料制备是将生产水泥的石灰质原料、粘土质原料与少量校正原料经破碎后，按一定配比、磨细为成分适宜、质量均匀的生料粉生产过程，煤粉制备是指将作为燃料的煤磨制成煤粉的过程；（2）熟料煅烧。熟料煅烧是将生料在水泥窑内煅烧至部分熔融得到以硅酸钙为主要成分的硅酸盐水泥熟料的过程，在这个过程中生料煅烧石灰石会分解产生二氧化碳，燃料在烧成系统中的燃烧也会产生二氧化碳；除此之外烧成系统排放的烟气会再通入余热锅炉进行余热利用，降低排烟温度，提高能源的利用效率；（3）水泥粉磨。水泥粉磨是将熟料配以一定比例的混合材、缓凝剂共同磨细为水泥产品。在生料和煤粉制备、熟料煅烧和水泥粉磨这三个生产工艺中，产生的电耗在扣除了余热发电也会折算二氧化碳排放量。

化石能源燃烧后形成的烟气伴随着大量二氧化碳排放，已成为全球最主要的二氧化碳排放方式。碳捕集与封存是公认的减少二氧化碳排放的重要手段。

二氧化碳捕集技术根据二氧化碳捕集位置主要可以分为三种，分别是燃烧前捕集、燃烧中捕集、燃烧后捕集。其中，燃烧中捕集与后捕集适用于水泥工业。燃烧中捕集就是富氧（全氧）燃烧技术的应用，原理是在燃烧过程中使用氧气来代替空气，使燃料在不含有或含有少量氮气的氛围中充分燃烧，需要采用空气分离设备获取纯氧。此种方式不仅增加燃烧产物中二氧化碳的含量，而且在富氧氛围中氮氧化物的浓度降到最低水平，从而在高浓度二氧化碳烟气中捕集二氧化碳，最后将烟气进行液化处理，显著降低二氧化碳的捕集能耗。燃烧后捕集则是采用适当的方法使烟气通过某种捕集剂与二氧化碳发生一系列物理化学作用，使二氧化碳与其他组分分离的过程。目前根据从烟气中捕获二氧化碳的方法的机理不同，燃烧后捕集二氧化碳的主要方法大致可以分为四种：吸收法、吸附法、膜分离法、低温分离法等。

针对水泥窑不同二氧化碳浓度原料气的碳捕集工艺可以采用化学吸收法、物理吸附法和低温精馏法等不同方法。对于高纯度的气源，宜直接采用低温精馏法；对于中等浓度气源，宜采用变压吸附+吸附精馏的方法；对于更低浓度的气源，更适合采用化学吸收耦合低温精馏的方法。随着水泥窑烟气碳捕集技术的推广应用，化学吸收法已成为应用最广泛的碳捕集技术，适用于二氧化碳浓度低于 20% 的气源，但由于化学吸收剂是液体，需要定期补充和更换，而且吸收剂再生需要蒸汽加热，因此运行成本较高。低温精馏技术则适用于纯度已经达到 90% 以上气源且对产品纯度要求很高、又需要液化储运的应用场景，无法适应目前成分复杂的燃煤水泥窑烟气。物理吸附技术是利用吸附剂的平衡吸附量随组份分压变化而不同的特性进行分离，属于简单的吸附-解吸物理过程，具有工艺简单、无毒、无污染的特点，主要包括变压吸附与变温吸附技术，吸附剂在高温或高压条件下吸附 CO_2 ，降温或降压后将 CO_2 解吸出来，通过周期性的温度或压力变化，从而使 CO_2 分离出来。由于压力可快速变换，因此变压吸附的周期一般较短，几分钟就能完成一个吸附再生周期，而变温吸附则受限于体系传热速度，加热和冷却的时间较长，变温吸附的周期会比较长，有时可以达到十几个小时，更适用于气体干燥领域，同时变温吸附需要对气体加热和冷区，因此能耗更高。鉴于常用气体吸附剂在常温常压条件下吸附容量及对混合气体中 CO_2 组分选择性较差，而在高压下吸附容量显著提升，因此变压吸附作为低能耗捕集技术更适用于中、高二氧化碳浓度的水泥窑炉烟气。

1.2 标准任务来源

碳捕集技术是水泥行业实现碳减排目标的关键路径之一。中国建材集团始终秉持“材料创造美好世界”的使命，积极推进全氧燃烧、二氧化碳捕集、氢能应用等前沿低碳技术的研发与工程实践，为水泥工业绿色低碳转型提供有力支撑。为规范水泥窑烟气碳捕集项目的工艺装备、过程控制、安全保障及性能指标等技术要求，推动变压吸附碳捕集技术在水泥行业的标准化应用，根据中国建筑材料联合会《关于下达 2026 年第二批协会标准制定计划的通知》（中建材联标发〔2026〕8 号，计划编号 2026-08-xbjh），由中国建筑材料联合会归口管理，天津水泥工业设计研究院有限公司等单位负责起草《水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范 变压吸附》团体标准。

1.3 标准制定的目的、意义

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。全氧燃烧耦合低能耗碳捕集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，水泥行业低能耗碳捕集技术已在示范项目中取得突破性进展。华润建材科技 2022 年承接了第二批全国建材行业重大科技攻关“揭榜挂帅”项目。2025 年，在封开基地建成 10 万级碳捕集与利用示范工程，5 万吨用于矿化养护生产加气混凝土制品，5 万吨拟用于生产食品级干冰。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》。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，也为全氧燃烧耦合低能耗碳捕集技术的规模化推广奠定了坚实的工程实践基础，目前亟需开展相关标准的研制工作。

1.4 与相关标准的关系

与本文件相关的其他标准，包括 GB/T 51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》、JB/T 12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》、JB/T 13413《燃煤烟气二氧化碳储存装备》、JB/T 12535《燃煤烟气碳捕集装置调试规范》、JB/T 12536《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》等，这些标准分别对煤电系统化学吸收的碳捕集系统的工艺系统、工程设计、装备选型、产品储存、系统调试运行及安全与职业卫生等过程进行了详细的规定。同时，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》也没有变压吸附工艺的相关规定。GB/T 46877-2025《二氧化碳捕集 燃烧后二氧化碳捕集系统通用要求》主要是针对燃烧后二氧化碳捕集系统的通用要求，有对吸附法的通用描述，但没有对变压吸附法的详细规定。而本文件是基于水泥窑烟气条件，侧重于变压吸附法的二氧化碳捕集工艺，对变压吸附法的碳捕集工艺系统、过程控制、安全、性能测试和运行维护等的进行了详细的规定，规范了烟气预处理和二氧化碳捕集工艺，保证了二氧化碳回收率和先进的能耗指标，有效减少了二氧化碳捕集系统的运行成本。

目前，行业标准主要针对化学吸收法路线，物理技术路线的系统性技术规范仍属空白，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。因此迫切需要制定统一的技术标准，规范工艺设计、设备选型和性能指标，为技术推广提供依据。本标准的研制，有助于促进低能耗碳捕集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。

1.5 起草组及工作简况

本文件的起草单位有：天津水泥工业设计研究院有限公司、中国中材国际工程股份有限公司、天津中材研究中心有限公司、青州中联水泥有限公司、大

连理工大学、中峰信和（大连）科技有限公司。

本文件主要起草人有：彭学平、赵亮、陈昌华、陈绍云、隋同波、林莉、代中元、金周政、武晓萍、胡红、贺朋、杜亮波、苏伟、姬忠全等人。

单位	编制人员	任务分工
天津水泥院	彭学平	标准框架设计、编制进度管理
	赵亮	分配章节任务
	陈昌华	工艺参数确定、技术指标验证
	代中元	标准正文各章节起草、编制说明撰写
	金周政	草案撰写、示范工程数据采集分析
	武晓萍	负责具体章节撰写
中材国际	隋同波	意见征集
	林莉	编制说明撰写
大连理工	陈绍云	工艺参数确定、技术指标验证
中材工程研究中心	贺朋	负责具体章节撰写
	杜亮波	负责具体章节撰写
中峰信和	胡红	工艺参数确定、技术指标验证
中联水泥	苏伟	工程验证、数据支撑
	姬忠全	工程验证、数据支撑

标准研制的工作简况：

1. 立项与启动阶段

2026 年 1 月，成立标准修订前期工作组，开展标准制定的前期准备工作，包括技术文献收集、行业需求调研和标准框架论证。

2026 年 3 月，完成立项申报工作，向工业和信息化部节能司提交行业标准制修订项目申报材料。

2026 年 5 月，召开标准启动会，正式成立标准起草工作组，明确任务分工，制定工作方案和技术路线。

2. 调研与编制阶段

2026 年 7 月，开展行业调研工作。起草组系统收集了国内外碳捕集相关技术文献、专利及工程案例；对水泥窑全氧燃烧耦合低能耗碳捕集工艺的烟气预处理、变压吸附、二氧化碳提纯、二氧化碳储存及过程监测与控制等关键技术

环节进行调研分析；结合青州中联、华润封开在水泥窑全氧燃烧领域的技术积累和工程实践，初步形成标准征求意见稿及编制说明。

2026年7月22日，建材行业重点标准“揭榜挂帅”项目（第一批）签约会暨项目研讨会在北京召开，中国建筑材料联合会党委书记、会长武庆涛出席会议并讲话，联合会标准质量部主任曹元辉主持会议，各项目挂帅负责人、团队成员及行业专家等50余人参加会议。会上，各揭榜单位分别汇报项目进展情况及研究成果，与会专家和代表围绕项目内容进行了深入研讨，为本标准高质量研制提供了坚实的机制保障和行业支撑。



2026年7月-9月，起草组根据专家意见建议进一步修改完善标准征求意见稿及编制说明。

二、标准编制原则

2.1 规范性

为了达到标准整体协调的目的，本文件在设计标准化术语、技术规范要素的起草表述规则等方面遵守了现行的 GB/T 1.1《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》、GB/T 20000.1《标准化工作指南 第1部分：标准化和相关活动的通用术语》、GB/T20001.4《标准编写规则 第4部分：试验方法标准》、GB/T20001.5《标准编写规则 第5部分：规范标准》规定的有关条款。

2.2 适用性

本文件编制依据国家及地方关于低碳发展、环境保护、安全生产等法律法规及相关政策要求，结合水泥行业绿色低碳发展需求，在调研国内建材及电力行业碳捕集工艺技术、装备及运营管理现状基础上，参考水泥窑全氧燃烧低能耗碳捕集工程实践经验，提出适用于水泥窑的变压吸附法二氧化碳捕集技术要求。

2.3 先进性

本标准在编制过程中，紧密结合目前国内水泥行业低能耗碳捕集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。二氧化碳捕集成本随着烟气中 CO_2 浓度增加而下降，标准采用全氧燃烧技术后烟气二氧化碳浓度显著提高的特点，提出了适用于变压吸附法捕集二氧化碳的系统性技术要求。主要考虑：（1）以推动水泥行业低碳技术进步、规范碳捕集技术应用为原则，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烟气适配性现实差异。

2.4 统一性

以 GB 50295《水泥工厂设计规范》、GB 4915《水泥工业大气污染物排放标准》、GB/T 51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》等为基础，与现有水泥工厂设计、制造、施工安装及生产运行的基本要求，以及国家和政府主管部门相关政策、法规、标准、管理办法等保持一致。

三、标准主要技术内容

3.1 范围

该部分规定了本标准使用的范围。

3.2 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。

3.3 术语和定义

本文件指定的术语和定义主要是根据工艺特点，规定了“变压吸附”，“真空变压吸附”，“吸附剂”等 5 个术语和定义。部分术语参照了《变压吸附提纯氢系统技术要求》GB/T 19773、《二氧化碳捕集 燃烧后二氧化碳捕集系统通用要求》（GB/T 46877-2025）、《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》（GB/T 51316）、《火力发电厂烟气二氧化碳捕集系统能耗测定技术规范》GB/T 45121。

3.3.1 变压吸附法。利用固体吸附剂对不同气体的吸附选择性以及气体在吸附剂上的吸附量随其压力变化而变化的特性，在一定的压力下吸附，然后通过降低被吸附气体分压使被吸附气体解吸的气体分离方法。

3.3.2 真空变压吸附。吸附过程在增压时进行，真空泵抽真空减压时解吸的气体分离方法。

3.3.3 吸附剂。用于实现 CO₂ 与其他气体分离的固体材料。

3.3.4 吸附塔。内装吸附剂，承受交变荷载，从含 CO₂ 气体中分离提纯 CO₂ 用设备。

3.3.5 预处理塔。利用水或者碱液脱除烟气中含有的氮氧化物、硫化物以及烟尘等杂质的塔器设备。

3.4 基本要求

3.4.1 系统构成

介绍了 CO₂ 捕集系统构成及系统主要的性能指标。捕集系统包括：烟气预处理装置、二氧化碳吸附装置、二氧化碳解吸与吸附剂再生装置；纯化系统包括：二氧化碳纯化装置、二氧化碳储存装置。

3.4.2 系统性能

1、基于青州中联年产 20 万吨 CO₂ 全氧燃烧耦合低能耗碳捕集示范项目的水泥窑烟气二氧化碳捕集装置长期运行经验数据，按照 GB/T 2589 综合能耗计算通则将电力、水折算热力消耗。二氧化碳浓度降低 CO₂ 捕集单元的能耗会显著增大，当 CO₂ 捕集项目的二氧化碳浓度 $\geq 70\%$ 时，经 CO₂ 捕集后 CO₂ 浓度达到 93%，烟气预处理单元能耗不宜高于 ≤ 0.06 GJ/t CO₂，CO₂ 捕集单元能耗不宜高于 0.46 GJ/tCO₂，CO₂ 提纯后 CO₂ 浓度达到 99.9%，压缩和纯化单元能耗不宜高于 0.7 GJ/tCO₂。

2、吸附过程捕集率设定为 90%，是结合变压吸附工艺技术特性与项目经济性综合确定的。捕集率指捕集前后烟气内二氧化碳的质量差值，与捕集前烟气中二氧化碳质量的比值，以百分比计，表征系统从烟气中脱除二氧化碳的能力。变压吸附工艺通过物理吸附完成气体分离，其性能受吸附剂选择性、吸附压力、解吸充分程度等条件制约。若一味追求更高捕集率，会造成吸附塔规格加大、吸附循环周期拉长，或是真空脱附能耗大幅增加；当捕集率由 90%提高至 95%时，能耗呈非线性上升，单位产品能耗随之明显增高。针对水泥窑炉烟气碳捕集场景，综合考量减排效果与全周期经济成本，最终选取 90%作为捕集率的平衡工况。

3、纯化过程回收率是指捕集得到的二氧化碳气体经压缩、冷凝或液化工艺后，最终获得的液态二氧化碳产品质量与压缩前二氧化碳质量的百分比。该环节的损失主要来自精馏过程中的不凝气排放。提升回收率需提高压缩机出口压力并降低液化温度，但这会导致压缩机组和制冷机组的功耗急剧上升。90%是综合考虑了技术性和经济性确定的参数。

4、对于液态二氧化碳产品来说，工业用二氧化碳、灭火用二氧化碳和食品级二氧化碳是经过低温精馏工段纯化后的产品。列出三种应用场景较为广泛产品，其产品性能分别符合：工业级产品性能符合 GB/T 6052 的规定，食品级产品性能符合 GB 1886.228 的规定，干冰产品性能符合 GB 4396 的规定。

5、设置烟气干基 CO₂ 体积分数宜不小于 70%的技术指标，主要基于全氧燃烧技术的工程实践和碳捕集经济性要求。二氧化碳浓度降低 CO₂ 捕集单元的能耗会显著增大，青州中联 20 万吨级全氧燃烧碳捕集示范项目运行结果表明，全氧燃烧工况下预热器出口烟气 CO₂ 干基浓度平均可达 82.7%。据此，将系统入

口烟气 CO₂ 干基体积分数下限设定为 70%，既为后续捕集提纯环节提供了浓度保障，也为不同规模、不同窑型水泥生产线的技术适配保留了合理裕度。

6、碳捕集系统耦合水泥生产线运行，其外排烟气虽经 CO₂ 捕集提纯处理，但本质上仍属于水泥窑系统的有组织排放源，不应因增设碳捕集单元而降低或规避其应达到的污染物排放控制要求。本条在引用 GB 4915 的基础上增加“及地方水泥行业污染物排放标准”的表述，确保标准适用范围的完整性和合规要求的全面。

7、捕集纯化系统的外排烟气本质上仍为水泥窑协同处置工况下的窑尾烟气，增设碳捕集单元不应改变或豁免其应执行的污染物排放标准。本条与上一条（非协同处置工况执行 GB 4915）共同构成了碳捕集系统外排烟气污染物排放控制的完整标准引用体系，体现了不同水泥窑运行工况下排放标准的差异化适用原则。

3.5 工艺与装备

3.5.1 一般规定

1、碳捕集纯化系统的工艺流程选型受多重客观因素制约，不同项目的原料烟气工况、产品输出标准、现场建设条件存在显著差异，无通用适配的固定工艺方案。其中，原料烟气的组分构成、温度、压力、杂质含量等核心性质，直接决定吸附、吸收、分离、纯化等核心单元的工艺适配性，是工艺选型的基础前提；二氧化碳产品的纯度、压力、输送或封存要求等产品指标，直接约束纯化工序的配置、操作参数及工艺深度；而项目场地规模、地形条件、配套公用工程、建设布局等场地条件，是工艺路线布置、设备选型及系统集成的重要限定条件。

工艺流程确定阶段需同步开展技术可行性与经济合理性综合比对。技术层面需验证所选工艺路线能否适配烟气工况、稳定满足产品指标要求，具备成熟的运行保障能力与安全可靠性；经济层面需统筹设备投资、运行能耗、运维成本、减排效益等核心指标，规避片面追求技术性能导致成本过高，或过度压缩成本导致系统运行稳定性、捕集纯化效率不足的问题。

在技术路线选择方面，烟气中 CO₂ 浓度是决定捕集工艺方案的关键因素。当 CO₂ 体积分数低于 30% 时，变压吸附法因分离推动力不足导致吸附剂装填量

和再生能耗显著增加，工程上通常优先选用化学吸收法。当 CO_2 浓度处于 30%~70% 之间时，变压吸附法在技术原理上具有可行性，可采用两级变压吸附工艺，但受限于 CO_2 分压较低，其捕集能耗将高于高浓度烟气工况。各项目应在可行性研究阶段根据原料烟气条件、产品要求及经济性指标进行综合比选。

2、碳捕集纯化系统中配置有引风机、压缩机等多种风机设备，是系统的主要耗能设备之一。要求所选风机能效不低于 2 级，在从设备选型控制系统能耗。

3、碳捕集纯化系统配置有原料气压缩机、真空泵、各种机泵等转动设备，电动机是这些设备的主要动力来源，其能效水平直接影响系统整体能耗。

4、碳捕集纯化系统的运行特点决定了大部分机泵需要连续或频繁启停运行，通常要求设置备用泵，在线备用可始终处于通电、预润滑或预热的待机状态，在运行设备故障时实现快速自动切换投入运行。

5、在 CO_2 捕集纯化过程中，经液化工序后的液态 CO_2 及其输送管道温度较低，提纯单元的冷却器、气液分离器等设备及管道也存在低温工况。若未采取有效保冷措施，不仅会造成大量冷量损失、增加系统能耗。 CO_2 液化及精馏设备属于低温工况设备，其保冷需求与空分、LNG 等深冷装置中的低温冷箱工况类似。冷箱内腔填充珠光砂是深冷行业最成熟的保冷方案，珠光砂导热系数低（ $0.0185\sim 0.029\text{W/m}\cdot\text{K}$ ），使用温度可覆盖至 -200°C ，完全满足 CO_2 液化系统的保冷需求；聚氨酯外壁包覆适用于管道保冷，闭孔率达 92% 以上，可有效阻隔水汽渗透。两种方式互为补充，共同构成完整的保冷体系。

6、水泥窑受原料配比、燃料种类、窑况变化及负荷调整等因素影响，其烟气量和烟气组分会在一定范围内持续波动。碳捕集系统作为水泥生产线的下游装置，其原料气来源直接受水泥窑运行工况制约，必须具备足够的操作弹性以应对上游波动。50% 的下限对应于水泥窑低负荷运行或检修减产工况，120% 的上限对应于水泥窑超产或工况波动导致的烟气量增加工况。

3.5.2 烟气预处理

1、烟气预处理单元是将玻璃窑烟气通过引风机送入降温塔底部，在塔内进行降温除尘，后再将处理后的烟气送入预处理塔底部，在塔内进行脱硫脱硝碱洗、脱硫脱硝水洗，把烟气中的粉尘、硫化物和部分氮氧化物杂质净化去除。主要设备包括引风机、降温塔、预处理塔、洗涤泵等设备。

2、水泥厂的大气污染物排放宜满足 GB 4915 及地方水泥行业污染物排放标准相关限值，粉尘、SO₂ 和 NO_x 排放值即可满足烟气预处理进气要求。

3、降温塔采用直接喷淋冷却方式，冷却水喷入降温塔，确保把进入降温塔的烟气温度降低到 45℃左右，冷却水从塔底排出，经过换热器与循环冷却水换热后重新进入降温塔循环使用。水泥窑烟气中含有的酸性物质经过降温洗涤处理后已低于烟气露点，烟气凝液和水洗水的水质会有腐蚀性，并且由于烟气中含有 Cl 离子，降温塔、预处理塔、液泵及连接管道应采用奥氏体不锈钢(316L)或碳钢内里材料，碳钢衬里应符合 GB/T50726 的要求。

4、预处理塔宜采用碱液作为脱硫液，预处理塔脱硫液管道应设置 pH 计，宜保持脱硫液 pH 值在 6.5~8.5 左右，微碱性，以保证脱硫液保持最佳脱硫效果以及设备管道不被腐蚀。预处理塔上段设置水洗段，是为洗涤脱除烟气携带的脱硫液雾滴，防止碱液雾滴随烟气带入下游捕集装置，避免污染捕集介质、堵塞设备与管道，减少后续单元的药剂损耗和设备故障。

5、烟气预处理装置出口温度不宜高于 45℃，是根据变压吸附法适用的工艺条件确定。吸附剂对二氧化碳的吸附能力与温度呈负相关，温度升高会导致吸附量下降。降温塔受到工厂循环水进行热交换降温限制，烟气温度在 20~50℃的吸附温度区间，吸附剂能保持较高的吸附容量，作为吸附剂和塔组选型依据。颗粒物含量≤5mg/Nm³，颗粒物是在原有的水泥生产线除尘后再经过水洗工艺的方式，继续除去粉尘颗粒，最大限度降低颗粒物堵塞吸附剂的微孔介孔的孔道，保证吸附剂吸附性能。SO₂≤20mg/Nm³、NO_x≤50mg/Nm³ 的指标要求，SO₂ 和 NO₂ 会通过不可逆的化学反应导致吸附剂永久失活、增加能耗和运营成本，通过预处理塔内的碱液配方，最大限度的脱除。烟气中的氯、氟组分具有强腐蚀性，可破坏金属设备防腐层，也会造成吸附剂化学中毒，需通过预处理脱除至低浓度水平。H₂S ≤5mg/m³ 硫化氢不仅会腐蚀设备，还易与捕集介质发生反应，污染 CO₂ 产品；若后续配套压缩、储运工序，硫化物杂质也会带来安全风险，需严格控制。重金属≤2mg/m³ 重金属组分可沉积在吸附剂孔隙内，造成吸附剂永久性中毒，且重金属属于污染物，会影响捕集后 CO₂ 产品品质，故设置该控制限值。

6、通过引用 JC/T 879 标准，对引风机的设计、制造和验收提出统一的技术要求，确保设备质量和运行可靠性。

7、水泥窑烟气经余热锅炉或增湿塔降温后，温度通常在 90℃~200℃之间，控制洗涤水温不高于 60℃，可为洗涤塔提供足够的传热温差，确保在实际运行中出口烟气温度稳定达标。

8、通过将干燥后烟气的露点控制在低于工况压力下气体饱和理论露点 10℃以内，确保烟气中的水分在后续增压、冷却、液化等过程中不会析出凝结，从而保护下游设备（压缩机、吸附塔、吸附剂、液化器、管道等）免受液态水侵蚀，防止冰堵、腐蚀、吸附剂潮解和设备故障，保障全系统的安全、稳定、长周期运行。

9、预处理塔的设计压力应为微正压，设计应符合NB/T 47041《塔式容器》的规定。

3.5.3 二氧化碳吸附

1、变压吸附捕集装置需要频繁的变化压力以达到工艺要求，故变压吸附装置主要设备应包括：烟气压缩机（提升烟气压力）、气液分离器（分离进入吸附塔组的游离水）、吸附塔组（CO₂吸附）、真空泵组（降低吸附塔内压力）、冷却器（降低 CO₂产品气温度）和缓冲罐（缓存 CO₂产品气）。

2、吸附压力决定吸附过程中 CO₂的吸附容量与传质推动力；再生方式（PSA、VPSA）的选取，则用于确定解吸推动力，决定吸附剂所需的再生深度，再生效果直接影响系统捕集率。常压解吸（PSA）通过将体系压力降至常压完成解吸，解吸推动力为吸附压力与常压之间的压力差。真空解吸（VPSA）采用抽真空手段进一步降低操作压力，解吸推动力为吸附压力与真空压力之差。因此，当吸附压力大于 1.0MPa 时，采用常压解吸即可实现 90%捕集率，系统可不配置真空泵。

3、吸附塔空塔气速过低，设备直径过大，投资增加。空塔气速过高会一方面会导致床层压降升高，从而导致压缩机功耗急剧增加，另一方面，气速过高会造成吸附剂颗粒因相互碰撞而粉化。

4、采用 VPSA 吸附塔组的多塔循环工艺，应满足“吸附、均降、逆放、抽真空、均升、终升”的多塔同步循环流程。采用 PSA 吸附塔组的多塔循环工艺，应满足“吸附、均降、逆放、均升、最终升压”的多塔同步循环流程。运行中可根据烟气量和组分波动，灵活调节各步序时长，高负荷时延长吸附时间防止穿透，低负荷时缩短循环时间降低能耗。

5、“均压”是变压吸附工艺中回收床层死空间内有效气体的关键步骤。吸附步骤完成后，吸附塔内除了被吸附剂捕获的 CO_2 外，塔内空隙中仍存有大量富含 CO_2 的气体。若直接逆放排空，这部分气体将全部损失，导致 CO_2 回收率显著下降。均压次数越多，死空间气的回收越充分， CO_2 回收率越高。根据现场运行数据，3 次均压可将 CO_2 回收率提升至 90% 以上。吸附塔的数量不少于 5 个匹配 $m \leq N - n - 1$ 原则，在同时吸附塔数 n 至少为 1 的前提下，若要求均压次数 $m \geq 3$ ，则 $N \geq m + n + 1 \geq 3 + 1 + 1 = 5$ 。因此，5 塔是实现 3 次均压的最低塔数。

6、吸附相中 N_2 、 O_2 、 Ar 等不凝性气体含量过高，将显著增加后续精馏塔的分离负荷，将杂质总量控制在 $\leq 10\%$ ，是保证后续提纯工序在经济合理负荷下运行的必要条件。

7、变压吸附的单个吸附塔每年的压力循环次数可达 30 万次以上。在 20 年的设计使用寿命内，累计循环次数可达数百万次。此类设备属于典型的承受循环载荷的压力容器。对压力容器进行疲劳校核，避免在长期交变载荷作用下，吸附塔筒体及接管连接处等应力集中部位可能产生疲劳裂纹，进而引发设备失效。

8、JC/T 3172 对碳捕集吸附剂的静态吸附容量、抗碎压力、磨耗率、比表面积、寿命以及年损耗率做出了明确的规定。分离系数是衡量吸附剂对混合气体分离能力的关键指标。分离系数越大，意味着吸附剂对 CO_2 的选择性越高，在吸附过程中 N_2 越容易作为尾气排出。

9、1) 变压吸附装置在运行过程中，各吸附塔依次经历“吸附→均降→逆放→抽真空→均升→终升”等步序的周期性切换，循环周期通常仅为数分钟。程控阀作为实现步序切换的执行元件，需在 1~3 秒内完成全行程启闭，以适应吸附塔组多塔同步循环时序的快速切换需求。同时，设备在数十年服役期内累计循环次数可达 $10^5 \sim 10^6$ 次以上，阀门需在此频繁动作工况下保持可靠运行。据此，本条款要求程控阀的设计寿命应达到 10^6 次以上，并具备承受频繁动作的耐用性。

2) 程控阀的密封性是决定 CO_2 产品纯度与系统收率的关键因素之一。若阀门存在微量内漏，将产生两方面的不利影响：一是在均压或升压步序中，高压侧气体窜入已完成再生的低压塔，稀释塔内富集的 CO_2 ，导致产品气纯度下降；二是在抽真空解吸步序中，内漏会使外部空气或相邻塔内气体被吸入真空系统，

部分 CO₂ 随真空泵排气逃逸，造成系统捕集率和回收率降低。ANSI VI 级为目前工业阀门最高密封等级，可有效控制微量内漏。

10、要求真空泵采用无油、无水结构，主要基于油或水的引入会污染吸附剂考虑，当油雾或水蒸气随抽吸气回流进入吸附塔时，与吸附剂接触后将导致吸附剂孔道堵塞、吸附容量下降甚至不可逆失活；其次，油/水污染富 CO₂ 气体将增加后续提纯工序的杂质负荷，影响最终产品品质。

11、辅助设备的设计应遵循该领域通用工程设计规范的基本原则。

3.5.4 二氧化碳纯化

1、二氧化碳提纯系统的作用是将变压吸附塔组排出二氧化碳烟气进行压缩、干燥、脱硫、吸附、精馏、冷却、液化，使二氧化碳达到工业级、食品级或其他要求。

2、将 CO₂ 降温至 0~10℃，降温过程中析出的冷凝水可在进入压缩机前通过气液分离器予以脱除。同时，可降低压缩机的排气温度，减轻后续冷却和液化工序的制冷负荷。

3、压缩机是将二氧化碳气体提升为高压气体、为二氧化碳气体液化提供压力的定型设备。应根据气量或压比选择不同的压缩机类型。根据所需二氧化碳被压缩的出口压力不同，活塞式压缩机分为单级或多级压缩，多级压缩每一级出口都有冷却器和分水器，冷却器如果是列管式则列管要用不锈钢管制作，不能用铜管或其他易腐蚀的材质制作。压缩机的每一级活塞环、气缸和阀片等和二氧化碳接触的部位都必须用耐蚀材料制作，活塞环用聚四氟乙烯材料制作。

4、1) 低温闸阀和低温球阀是液化工序中最常用的阀门类型，闸阀流阻小、适用于需要全开全关的管线段，球阀操作迅速、密封可靠，两者均可满足液化系统的截断与切换需求。低温闸阀或低温球阀在关闭状态下，阀腔（或阀体中腔）会形成一个密闭空间。当阀门处于关闭位置时，残留在阀腔密闭空间内的低温液态 CO₂ 逐渐吸收环境热量升温气化。2) 液态 CO₂ 气化后体积急剧膨胀，使阀腔密闭空间内的压力在短时间内急剧升高。若无可靠的泄压通道，阀腔压力可能超过阀体材料的许用应力，轻则导致介质泄漏，严重时可能造成阀体开裂甚至爆裂。在阀门上设置泄压孔，可使阀腔密闭空间与介质流道相通，当阀腔内压力异常升高时及时将压力泄放至流道中。

5、冷箱是低温工况下集成保冷、换热、分离设备的模块化结构形式，具有结构紧凑、保冷性能优良、冷损小的特点，可有效减少低温 CO₂ 介质冷量散失，降低系统能耗。T/CCGA 20004 对冷箱的材料选用、结构设计、制造检验、保冷施工等方面提出统一技术要求，选用该标准可保障冷箱设备的安全性、可靠性与工程适用性，设计单位也可根据项目工况、场地条件、设备供货情况，选用其他满足保冷指标、安全可靠的保冷设备方案。

6、未被捕集的排放气含有压力能，流程中富余冷量具备回收价值，直接放空将造成能量损失。将排放气、冷量返回系统内部利用，可降低装置能耗与公用工程消耗，提升系统能效与项目经济性；设计时应综合评估回收方案的技术可行性与投资合理性。

7、本条推荐选用液氨、工质 CO₂ 或氟利昂类制冷剂，其技术依据如下：

（1）液氨是一种优良的天然制冷剂，标准蒸发温度为-33.4℃，单位容积制冷量大，热导率高，蒸发潜热远高于氟利昂类制冷剂，在安全管理和设备维护方面要求较高。液氨法和氟里昂蒸发法是 CO₂ 液化工程中应用最为广泛的两种工艺路线。（2）工质 CO₂。CO₂ 作为一种天然工质制冷剂，具有 ODP 为 0、GWP 为 1 的显著环保优势。采用捕集得到的 CO₂ 产品气部分作为系统制冷剂，可实现自持式液化流程，减少对外部制冷剂的依赖。（3）ODP=0 且 GWP 值较低的环保工质。使用对臭氧层无破坏作用的氢氟碳化物，若选用氟利昂类制冷剂，应明确具体品种并确保其符合国家现行消耗臭氧层物质和氢氟碳化物管控规定。

3.5.5 二氧化碳储存

1、碳捕集系统的储存环节无论上游采用化学吸收法或变压吸附法捕集工艺，经提纯后液态 CO₂ 的储存和装运要求本质相同。本条款通过直接引用的方式，使变压吸附系统的 CO₂ 储存设计能够充分借鉴化学吸收法在同领域的工程经验和技术积累。

2、因封闭管段未设置压力释放阀而导致超压事故的案例已有报道。若未安装泄压阀，当管路中压力积聚至超过管道承压能力时，将直接引发管道破裂。

3、自增压气化器是液态 CO₂ 储存装置的关键配套设备，其功能是将储罐引出的液态 CO₂ 加热气化，生成的气体返回储罐气相空间以维持或提升罐内压力，

保证储罐的正常出液和输送。本条款列举了四种典型热源类型，覆盖了目前工业应用中最主要的自增压气化器加热方式。

4、首次投用前若罐内残留有空气等杂质气体，直接充装液态 CO₂ 将导致产品受到污染，无法满足 CO₂ 品质要求，空气中的氧气、氮气会混入介质降低 CO₂ 产品纯度，水汽遇低温易冻结，堵塞阀门、管路，还可能诱发设备内应力风险。采用抽真空联合二氧化碳吹扫的方式，可逐步置换罐内原有气体，将罐内气体组分置换至合格水平，同时提升罐内压力至设定储存压力，提前建立储罐的工况环境。置换完成并检验合格，方可进行液态二氧化碳充装作业。

3.5.6 过程控制

1、碳捕集装置工艺参数多、工况调节连续性强，设置独立的 DCS 监测与控制系统，可实现对温度、压力、流量、液位、组分等关键参数的集中监控、自动调节与联锁保护，保障系统稳定、安全、高效运行。为实现全厂统一管控、协同运行，碳捕集系统需与水泥生产线中央控制室建立数据通讯与信息集成，实现工艺数据共享、工况联动、集中监视与统一调度。

2、过程控制是对水泥窑碳捕集控制系统及系统类型进行规定，对系统的热工参数、热工保护系统应遵循的原则等进行了详细描述。

3、SH/T 3092 规定了分散控制系统（DCS）工程设计的原则和要求。此外，石油化工行业已有针对二氧化碳捕集工程的专项技术规范（SH/T 5005-2025），其中明确将仪表与控制系统纳入规范内容。本技术涉及的碳捕集纯化系统与石油化工行业在工艺流程、控制要求方面具有一定相似性，参照 SH/T 3092 有助于确保控制系统的设计质量和工程验收的规范性。

4、控制系统的供电设计宜符合 HG/T 20509《仪表供电设计规范》的相关规定，主要基于碳捕集纯化系统与化工装置在工艺流程、控制要求及安全等级方面的高度相似性。该标准对仪表电源的负荷分级、供电方式、电源质量、冗余配置及接地防雷等提出了系统性要求，可有效保障 DCS 控制系统、在线分析仪表、气体检测报警系统及程控阀等关键设备的供电可靠性，防止因供电波动或中断导致控制系统误动作、吸附塔步序切换异常或安全联锁失效，确保碳捕集纯化系统安全、稳定、长周期运行。

5、HG/T 20513《仪表系统接地设计规范》对保护接地、工作接地、屏蔽接地等提出了系统要求。碳捕集纯化系统在工艺流程和控制要求上与化工装置具

有相似性，参照上述标准执行，有助于确保控制系统的供电可靠性和接地安全性，保障系统稳定运行。

6、GB/T 26282《水泥回转窑热平衡测定方法》规定了水泥回转窑气体的温度、压力、流量、成分、含湿量等参数的测定方法。碳捕集系统的原料气直接来自水泥窑烟气，其流量、温度、压力及 CO_2 、 O_2 、 CO 等组分浓度是计算碳捕集率、能耗指标及系统物料平衡的基础参数。引用该标准可确保水泥窑烟气参数的测定方法与水泥行业既有技术规范保持一致，使捕集系统的性能测试数据具备行业可比性。

7、GB/T 37186《气体分析 二氧化硫和氮氧化物的测定 紫外差分吸收光谱分析法》规定了紫外差分吸收光谱法测定 SO_2 和 NO_x 的方法， SO_2 测定范围为 $0.2\sim 5000\text{ mg/m}^3$ ， NO 测定范围为 $0.3\sim 5000\text{ mg/m}^3$ ， NO_2 测定范围为 $2\sim 5000\text{ mg/m}^3$ 。烟气预处理单元的脱硫脱硝效率直接决定后续变压吸附吸附剂的使用寿命， SO_2 和 NO_x 的精确检测是评价预处理效果、控制吸附剂中毒风险的关键依据。紫外差分吸收光谱法具有响应快、可多组分同时测量的特点，适用于碳捕集系统在线监测需求。

8、气预处理塔采用碱液脱硫工艺，脱硫液 pH 值直接影响脱硫效率和设备腐蚀速率，需维持在 $6.5\sim 8.5$ 的微碱性范围，烟气循环洗涤水 pH 值低于 7 时，脱硫液不具备脱硫功能，需重新更换或再生脱硫液。采用玻璃电极法测定脱硫液 pH 值，可确保测量结果的准确性和可重复性，为脱硫液补碱和排放控制提供可靠依据。

9、碳捕集系统的 CO_2 捕集率、产品纯度以及吸附塔内 O_2 含量监测均依赖在线分析仪表的准确性和稳定性。该标准对在线测量系统的性能特征、校准周期及质量控制提出系统性要求，可保障 CO_2 和 O_2 检测数据的可靠性，支撑系统性能评价和安全联锁控制。

10、烟气预处理出口颗粒物含量需控制在 $\leq 5\text{ mg/Nm}^3$ ，以防止粉尘堵塞吸附剂微孔孔道、降低吸附容量。采用该标准的重量法测定颗粒物浓度，是评价预处理除尘效果、保障吸附剂长期稳定运行的基础检测手段。

11、碳捕集纯化系统的产品质量控制、化学药剂性能监测及非正常工况分析需要依托固定化验设施完成。水泥工厂化验室在生产过程中承担原燃材料、半成品、成品的检验与控制职能，对质量控制的预见性和防范性具有不可替代

的作用。碳捕集系统作为水泥生产线的下游装置，其化验分析工作可依托或参照水泥厂既有化验室体系运行，但鉴于 CO₂ 产品纯度检测、化学药剂性能分析等具有专业性，宜配套设置专项化验分析能力。

11、系统开工阶段涉及设备吹扫、置换、气密性试验等操作，停工阶段涉及系统置换、排空等过程，均需通过取样分析确认系统中氧含量、CO₂ 浓度等关键指标是否满足安全操作条件；故障排查时亦需通过取样分析快速定位工艺异常原因。在上述工况下，在线分析仪表可能存在量程不足、测量介质不适用或尚未投运等情况，设置临时分析取样口可为人工取样化验提供便捷、安全的操作条件，确保非正常工况下工艺状态的可监控性。

5、JC/T 3172《玻璃窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范》是玻璃行业针对烟气碳捕集领域的专项标准，由建材行业归口管理，对吸附法的捕集纯化系统的过程控制参数作出了系统性规定，包括各工艺单元的温度、压力、流量、液位等关键参数的监测与控制要求，以及仪表配置、DCS 控制系统设计等技术内容。规定系统主要过程控制参数宜符合该标准的相关规定，主要基于 JC/T 3172 作为建材行业标准，其参数设定范围是基于变压吸附法碳捕集工程长期运行数据确定的，具备一定的参考价值。

3.6 安全与职业卫生

3.6.1 安全

1、GB/T 46877-2025 规定了燃烧后二氧化碳捕集系统的分类与组成以及技术要求，适用于碳捕集系统的设计和建造。该标准是碳捕集领域的通用性国家标准，对捕集系统的安全要求作出了系统性规定。

2、碳捕集纯化系统涉及 CO₂、氨等介质，其中液氨属于有毒且可燃介质。在制冷机房、液氨储罐区、CO₂ 压缩机厂房等可能发生气体泄漏或积聚的区域，设置固定式可燃气体和有毒气体探测器并配置声光报警，是及时发现泄漏、启动应急处置的第一道防线。该标准对探测器的选用、报警值设定、安装位置等作出了系统规定，引用该标准可保障检测报警系统的规范性和有效性。

3、二氧化碳为窒息性气体，密度大于空气，在封闭或半封闭空间内容易积聚于低洼处，导致氧含量降低引发人员窒息。液氨泄漏后氨气亦可能在通风不良区域积聚。在封闭式厂房及室外通风不良地坑设置 O₂ 和 CO₂ 探测器并配备声

光报警装置，可实时监测环境气体浓度，防止人员误入危险区域。密闭厂房设置有效通风系统，可从源头降低有害气体积聚风险，通风系统设计引用 GB/T 51316 可确保与碳捕集工程设计整体协调。

4、碳捕集纯化系统涉及的泄漏风险点位包括：CO₂压缩机及管道法兰连接处、吸附塔程控阀组、真空泵密封处、液氨制冷系统阀门及储罐、CO₂储罐及装车区等。GB/T 50493 对检测点的确定原则、探测器的安装位置及报警值设定提供了技术依据；GB/T 51316 对碳捕集工程的安全监测与报警设计提出了总体要求。

5、氨具有毒性和刺激性，制冷设备泄漏、系统超压、安全阀起跳等异常工况时，须经有效处理后方可排放。将事故排放气引至事故水池进行吸收处理或引至焚烧炉燃烧处理，可有效降低氨气排放的环境和安全风险。GB 15603《危险化学品仓库储存通则》规定了危险化学品仓库储存的基本要求、储存要求、装卸搬运与堆码等内容，适用于危险化学品储存、经营企业的仓库储存管理。液氨的储存和分类应符合该标准的要求，包括与禁忌品的隔离、堆垛间距控制、个体防护等，确保液氨储存环节的安全合规。

3.6.2 职业卫生

1、碳捕集纯化系统涉及 CO₂、氨等介质的储存与使用，其职业卫生防护措施参照水泥工厂职业安全卫生设计规范执行，有助于确保防护设施的系统性和规范性。

2、碳捕集纯化系统涉及 CO₂、氨等危险物质的储存和使用，一旦发生泄漏，可能对现场作业人员造成中毒、窒息等急性危害。配备事故淋洗器、洗眼器、个人防护用品、急救包等应急救援设施，可在事故发生时提供第一时间的应急处理，降低人身伤害程度。

3、碳捕集纯化装置涉及 CO₂、氨等危险化学品，工作场所存在窒息、中毒、冻伤等安全风险，规范设置安全标志有助于提醒作业人员注意危险、遵守安全操作规程，减少因误入危险区域或误操作引发的事故。

4、规定危险化学品相关企业及经营单元应按照 AQ 3013 执行管理和设计工作，主要基于碳捕集纯化装置涉及氨等危险化学品的储存和使用管理需要。

5、碳捕集纯化装置中吸收塔、吸附塔、储罐等密闭设备检修作业的安全风险管控需要。维修人员进入此类受限空间作业时，可能存在缺氧、有毒有害气体积聚以及可燃气体富集等风险。

6、参照 GB/T 50087 执行噪声防护设计，可通过选用低噪声设备、基础减振、隔声罩、消声器等措施从源头和传播途径上控制噪声水平，保障作业人员职业健康。

3.7 性能测试

1、吸收过程捕集率是指，二氧化碳吸附前后烟气中二氧化碳质量差值与捕集前烟气中二氧化碳质量的百分比。

2、纯化过程回收率是指，捕集烟气中二氧化碳后，经过压缩和液化的二氧化碳产品质量，与压缩和液化前二氧化碳质量的百分比计算。

3、烟气预处理能耗是指：系统性能测试期间，碳捕集系统对进入捕集单元的原料烟气进行降温、除尘、脱硫、脱硝、水洗等预处理过程所消耗的能量，统计范围包括引风机、降温塔、预处理塔、洗涤泵及相关循环水系统等设备的电耗、水耗及蒸汽消耗（如有）。

4、CO₂捕集能耗是指，系统性能测试期间，碳捕集系统捕集二氧化碳所消耗的能量，统计范围包括：烟气预处理单位、CO₂捕集单元。

5、CO₂纯化能耗是指，系统性能测试期间，捕集烟气中二氧化碳后，压缩和液化二氧化碳所消耗的能量。统计范围包括 CO₂压缩单元、CO₂净化单元、CO₂液化单元和 CO₂储存单元。

6、性能考核进行满负荷 168 小时运行，CO₂捕集系统满负荷且运行稳定时进行，项目验收要符合各主机设备外观完整、表面无油污、变形及锈蚀；低温设备无泄漏、表面无刻痕及钢印；吸附剂机械性能良好，无破碎情况，分离效果达到设计要求；控制系统运行稳定。

3.8 运行维护与管理

3.8.1 运行管理

1、设置专职技术管理人员，可确保对吸附剂性能衰减、程控阀密封状态、真空解吸效率、产品纯度波动等专业问题具备持续跟踪和判断能力。

2、碳捕集纯化系统工艺流程长、设备类型多、控制参数密集，从烟气预处理、变压吸附、CO₂提纯到液化储存，各单元之间存在密切的物料和能量耦合关系。以变压吸附单元为例，吸附压力、解吸真空度、均压次数、循环周期等参数相互制约，任一参数偏离设计工况均可能导致捕集率下降或产品纯度不达标。运行人员若仅掌握单一设备的操作而缺乏对系统整体运行逻辑的理解，难以在工况波动时作出准确判断和调整。

3.8.1 系统维护

1、建立维护保养记录制度，可为设备生命周期管理、故障原因追溯、备件计划编制和大修决策提供依据。

2、碳捕集纯化系统中的吸附塔、CO₂储罐、缓冲罐等均属于压力容器范畴，且变压吸附塔承受高频交变载荷，属于典型的承受循环载荷的压力容器。依据 TSG 21 进行定期检验，可及时发现筒体、接管连接处等应力集中部位的疲劳裂纹等缺陷。

3、TSG 31-2025《工业管道安全技术规程》涵盖材料、设计、安装、监督检验、使用、定期检验等全生命周期要求。碳捕集纯化系统中的 CO₂ 输送管道、真空管道、液氨制冷管道等均属于工业管道范畴。该规程进一步明确工业管道适用范围，新增动力管道、制冷管道、非金属管道等专项安全技术要求，并加强对工业管道使用登记、定期检验等使用管理。

4、TSG 08《特种设备使用管理规则》要求使用单位在设备投入使用前或投入使用后 30 日内办理使用登记，并建立“主要负责人—安全总监—安全员”三级安全责任架构。碳捕集纯化系统涉及的吸附塔、储罐、压力管道等特种设备，使用单位应按规定办理使用登记、建立设备档案、实施日常维护保养和定期自行检查。对于压力管道，实行按单位登记制度，使用单位应建立管道使用登记档案，确保运行期间的安全监控。未办理使用登记的管道不得使用。

5、建立维护保养记录制度，可确保每次维护操作有据可查，为设备生命周期管理、故障原因追溯和备件计划编制提供依据。

6、碳捕集纯化装置停运后，预处理塔内可能残留含硫、含氯的洗涤液或沉积物，长期滞留将加剧塔体和填料腐蚀；吸附塔内吸附剂可能因吸附水分或杂质而性能下降甚至劣化，需检查吸附剂状态并评估是否需要更换或再生；精馏塔底部可能残留重组分杂质，若不及时清理将影响重新投运后的产品纯度。停

运检查清理是保障装置再次启动时能够达到设计性能的必要措施，也是防止设备腐蚀、吸附剂中毒等隐性损伤累积的关键环节。

7、捕集纯化系统涉及压力容器和压力管道的定期检验、安全附件校验、设备维护保养等记录，这些记录是设备全生命周期管理和安全追溯的基础依据。

四、主要验证情况分析

目前建材行业采用变压吸附的 CO₂ 捕集技术实现稳定运行的项目，主要有青州中联水泥有限公司在 2024 年建成的年产 20 万吨全氧燃烧富集提纯示范项目以及在广东肇庆华润水泥（封开）有限公司建成 10 万吨级示范工程。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。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耦合低能耗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，收集到的 CO₂ 捕集提纯能耗、CO₂ 回收率、系统产量以声明单位进行核算，主要情况介绍如下：

青州中联水泥有限公司年产 20 万吨全氧燃烧富集提纯示范项目

（1）工程概况

项目依托青州中联水泥有限公司 2#6000t/d 水泥熟料生产线，建设一条年产 20 万吨 CO₂ 水泥窑全氧燃烧结合低能耗碳捕集工程应用示范线。项目主体工程包括 CO₂ 自富集系统、CO₂ 捕集提纯系统、制氧系统以及相关公用工程。其中，CO₂ 捕集提纯系统采用变压吸附结合吸附精馏的组合技术方案，年产 20 万吨液态二氧化碳（单位产量 645 t/d）。其中，工业级 CO₂ 为 15 万吨/年，食品级 CO₂ 为 4.5 万吨/年，干冰为 0.5 万吨/年，产品质量达到 GB/T6052-2011 国家工业级标准和 GB1886.228-2016 国家食品级标准。

（2）主要技术经济指标

序号	项目		单位	设计值	备注
1	入口烟气参数	入口烟气量	Nm ³ /h	25040	标况

		入口烟气温度	℃	210	
		入口烟气压力	Pa	-100	
		入口 CO ₂ 浓度	%	64.3	湿基
2	主要性能参数	CO ₂ 捕集率	%	92	
		变压吸附出口 CO ₂ 浓度	%	97.8	
		装置小时产量	t/h	26.88	
		装置设计年产量	t/a	200,000	
		年运行时间	h	7440	
		产品纯度	%	99.94	
3	消耗参数	电	kwh/t	248	
		工业水补水	t/t	1	

(3) 实施效果

示范项目于 2024 年 4 月首次产出液态二氧化碳产品，8 月进行了 72 小时性能测试，顺利通过，各项指标优于设计值。CO₂ 捕集提纯系统电耗 48.36 kWh/t.CO₂，CO₂ 产品纯度达到 99.94%，产品质量符合 GB/T 6052 国家工业级标准和 GB1886.228-2016 国家食品级标准，CO₂ 捕集率达到 92%，综合能耗 ≤1.03 GJ/t.CO₂，关键技术指标达到国际先进水平。

五、准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明

该标准内容经编制组核查，不涉及专利事宜。

六、产业化情况、推广应用论证和预期达到的经济效益等情况

6.1 产业化情况

当前我国水泥行业正处于绿色低碳转型的关键阶段，水泥窑低能耗碳捕集技术作为全氧燃烧的核心配套技术，已在国内多家大型水泥企业完成中试及工业化示范应用，形成了从水泥窑全氧燃烧到烟气捕集纯化的完整技术体系。烟气压缩设备、压力容器、程控阀组以及 PLC 控制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，为全氧燃烧耦合碳捕集技术的规模化落地提供了坚实的产业支撑。

6.2 推广应用论证

国内外水泥行业的延伸：水泥窑全氧燃烧技术的烟气 CO_2 浓度可富集至 80% 以上，有利于变压吸附工艺发挥效率优势。青州中联项目的成功经验可为水泥行业 CCUS 工程项目的应用提供直接参考，推动变压吸附碳捕集技术的推广应用。目前，天津水泥工业设计研究院有限公司开展了德国海德堡水泥 70 万吨/年 CO_2 规模并用于封存项目的工程设计，应用了全氧燃烧耦合变压吸附技术。

与下游利用技术的衔接：提纯得到的高浓度 CO_2 气体（纯度 $>99.9\%$ ），可作为多种下游利用技术的优质原料气。包括用于食品级 CO_2 的深加工制备、化工合成、与绿氢合成绿色甲醇及可持续航空燃料以及油田驱油与地质封存等。本技术为上述碳利用路径提供了“稳定、连续、高纯”的原料气来源，是打通“碳捕集”与“碳利用”全链条承上启下的关键中间环节。除工业级应用外，本技术产出的高浓度 CO_2 还可衔接农业气肥、微藻养殖等生物质利用方向。水泥生产线分布广泛，可就近为周边现代农业、水产养殖及生物固碳项目提供低成本 CO_2 供应，实现工业排碳与农业固碳的区域级循环耦合，进一步拓展了碳利用的场景边界。

6.3 预期达到的经济效果

1、降低碳捕集运行成本。以年产 20 万吨液体二氧化碳装置为测算基准，本技术单位产品电耗可控制在 300 kWh/t 以下，且无需外供蒸汽，单位 CO_2 制备能耗及运行成本较常规燃烧后化学吸收法降低 25% 以上，在全氧燃烧技术路线下具备突出的成本竞争力。

2、实现减污降碳协同增效。除碳捕集主效益外，全氧燃烧工况可同步抑制热力型氮氧化物的生成，降低窑尾脱硝系统的运行负荷与药剂消耗，进一步压缩环保设施运维支出。未来随着可再生电力在工业供电中占比的持续提升，本技术的降碳效益将更加显著，综合运行成本仍有进一步下探空间，长期经济效益向好。

3、支撑碳配额合规履约。全国碳市场已明确将逐步扩容至建材行业，水泥企业即将纳入碳配额管理体系。本技术为企业提供了可靠的碳减排手段，可实质性降低企业年度温室气体净排放量，减少碳配额采购支出，同时有效规避未来可能开征的碳税所带来的财务风险。

4、拉动碳捕集装备产业链协同发展。本技术的规模化推广将催生对压缩机、真空泵、压力容器、CO₂提纯设备等核心装备的持续需求，带动上游材料加工、装备制造及下游工程服务等配套产业协同发展，推动形成完整的碳捕集装备产业链，为区域经济培育新的增长动能。

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

与《水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范：变压吸附》（以下简称《技术规范》）内容相关的标准，国内标准现有 GB/T 51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》、JB/T 12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》、JB/T 13413《燃煤烟气二氧化碳储存装备》、JB/T 12535《燃煤烟气碳捕集装置调试规范》、JB/T 12536《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》，国际和国外标准现有 ISO 27919-1:2018《Carbon dioxide capture - Part 1: Performance evaluation methods for post-combustion CO₂ capture integrated with a power plant》、ISO/TR 27912:2016《Carbon dioxide capture - Carbon dioxide capture systems, technologies and processes》。

GB/T 51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》主要对烟气二氧化碳捕集纯化工程设计进行了规范，包括工艺系统、设备与材料、总图布置、装置布置与管道设计、仪表与控制系统、公用工程，节能环保，安全与职业健康等。该标准的适用于新建、改建或扩建的烟气二氧化碳捕集纯化工程设计，其中烟气二氧化碳捕集纯化装置所处理的烟气介质中二氧化碳含量需在 3%-20%之间，包括火电厂、水泥厂、钢铁厂、石油化工等企业有化石燃料燃烧形成的烟气。烟气中二氧化碳含量需在 3%-20%之间的回收装置的设计可参照该标准。该标准不限定烟气的来源，并重点侧重于烟气二氧化碳捕集系统的整体工艺布置，包括吸收与解吸工艺、压缩与脱水工艺、液化与储存工艺、动静设备、装置布置、仪表控制等其他工艺布置。

本《技术规范》在总体框架上，采纳了从烟气预处理、捕集纯化到储存的设计思路，但相较于 GB/T 51316，本《技术规范》聚焦水泥窑烟气变压吸附法捕集工艺，详细规定子系统设备构成、核心技术参数、过程控制要求等内容，是对 GB/T 51316 在变压吸附技术路线的专业补充。

JB/T 12536《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》适用于燃煤烟气捕集量为每年 100 万吨或以下，并采用化学吸收法的二氧化碳捕集装置的运行、维护和安全。该标准适用范围限定了烟气来源应为煤炭燃烧，限定了二氧化碳捕集量应为每年 100 万吨或以下，该标准内容的重点在于规范了二氧化碳碳捕集装置运行操作，涵盖启动、运行调整、停运、故障处理、安全运行、维护管理等操作要点。对整个运行过程的设备操作进行了规范，对设备发生故障常见原因和处理方法进行了分析，重点在于碳捕集装置的运行管理和维护。

JB/T12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》适用于燃煤锅炉烟气有机胺吸收法二氧化碳捕集需采用的装备，以及燃气、燃油、垃圾和生物质燃烧以及冶金化工行业的尾气采用的有机胺吸收法二氧化碳捕集装备也可以参考执行。该标准重点关注有机胺吸收法二氧化碳捕集装备的要求、调试、启动验收、运行维护、安全防护、标识标牌、包装与贮存运输等设备设施的调试启动管理。该标准对装备，电气系统，热工控制及建筑结构进行了规定。此外对运行维护也进行了规范。

本《技术规范》与 JB/T12536《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》、JB/T12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》相比，侧重点不同，本《技术规范》侧重于采用变压吸附法的二氧化碳捕集工艺系统，强调在设计阶段对水泥窑的碳捕集工艺流程、设备设计要求、核心技术参数、过程控制要求、各子系统衔接以及协调搭配要求。

本标准聚焦于水泥窑全氧燃烧技术，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。

八、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

8.1 《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》GB/T 51316-2018

《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》（GB/T 51316，以下简称《设计标准》）已于 2018 年 9 月发布，2019 年 3 月开始实施，规定了采用化学吸收法的烟气二氧化碳捕集纯化项目在建设前期的规划，适用于新建、改建或扩建的烟气二氧化碳捕集纯化工程设计，其中《设计标准》中烟气二氧化碳捕集纯化装置所处理的烟气介质中二氧化碳含量在 3%-20%之间，二氧化碳的来源包括火电厂、水泥厂、钢铁厂、石油化工等企业由化石燃料（煤、石油、天然气）燃烧形成的烟气，这些烟气回收装置的设计可参照《设计标准》执行。《设计标准》为采用化学吸收法捕集二氧化碳的工程设计奠定了基础，在包括总则、术语、基本规定、工艺系统、设备与材料、总图布置、装备布置与管道设计、仪表与控制系统、公用工程、节能与环保、安全与职业卫生等方面进行了详细的说明。本《技术规范》是针对水泥窑烟气且二氧化碳浓度高于 30%的碳捕集系统中各子系统组成、技术参数与性能测试进行了相关规定，沿用了《设计标准》中对压缩、纯化部分的相关规定，并补充了关于变压吸附的内容，因此本《技术规范》与《设计标准》协调配套，没有冲突。

九、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见。

十、标准性质的建议说明

建议本文件作为行业推荐性标准发布。

十一、贯彻标准的要求和措施建议

建议按照标准报批计划确定实施日期。

十二、废止现行相关标准的建议

本文件为新制定标准，无需废止其它标准。

十三、其它应予说明的事项

无。