

项目统一编号：

水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范 编制说明

《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》编制组

二〇二二年十月

目 录

一、工作简况	3
1.1 行业发展现状	3
1.2 标准化现状	4
1.3 标准任务来源	5
1.4 标准制定的目的、意义	5
1.5 与相关标准的关系	5
1.6 起草单位说明	6
1.7 主要工作过程	7
二、标准编制原则	7
2.1 协调性	7
2.2 适用性	7
2.3 先进性	7
2.4 统一性	7
三、标准主要内容	8
3.1 范围	8
3.2 规范性引用文件	8
3.3 术语和定义	8
3.4 系统要求	8
3.5 系统工艺与装备	9
3.6 安全与职业卫生	14
3.7 运行与维护管理	15
3.8 项目建设及验收	14
四、主要验证情况分析	16
五、标准中如果涉及专利，应有明确的知识产权说明	17
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	17
七、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 关键指标对比分析或与测试的国外样品、样机的相关数据对比情况	18
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	19
九、重大分歧意见的处理经过和依据	20
十、标准性质的建议说明	20
十一、贯彻标准的要求和措施建议	20
十二、废止现行相关标准的建议	20
十三、其它应予说明的事项	20

一、工作简况

1.1 行业发展现状

随着社会经济的发展、人类活动的不断加剧，能源的持续消耗，造成了大量温室气体的排放。其中二氧化碳排放占比最大，约占温室气体排放的 90%以上，而这些人类活动所产生的二氧化碳约 95%以上来自于化石能源（煤、石油、天然气）的消耗，我国的化石能源消费占比也同样巨大，根据国家统计局发布的数据显示，2021 年化石能源的消耗占比为 83.4%，达到 4370.16 亿吨标准煤。化石能源的燃烧已成为全球最主要的二氧化碳排放方式。根据世界能源署（IEA）统计，2019 年全世界二氧化碳总排放量为 336.2 亿吨，而中国二氧化碳排放量为 99.2 亿吨，约占全球二氧化碳排放量的 30%。

经中国建筑材料联合会核算（2020 年度《中国建筑材料工业碳排放报告》），我国建筑材料工业 2020 年二氧化碳排放 14.8 亿吨，电力消耗间接折算约为 1.7 亿吨二氧化碳排放。其中水泥行业二氧化碳排放 12.3 亿吨。电力消耗间接折算约为 8955 万吨二氧化碳排放。水泥行业约占建材行业碳排放量的 83%，约占全国碳排放量的 12.2%。基于这种现状，中国在控制碳排放、实现绿色发展方面积极应对，二氧化碳排放增速明显放缓。中国碳中和发展报告（2022）指出，2000 年前，中国二氧化碳排放量增速基本稳定于 5%左右，2001~2010 年，中国二氧化碳排放量，一度高达 18%。2005 年，中国二氧化碳排放成为全球第一大二氧化碳排放国。2011 年以后，基本保持在 5%以下。预计“十四五”期间二氧化碳排放量增速将继续保持相对平稳，二氧化碳排放总量基本维持在 100 亿吨左右。二氧化碳排放是引起了全球气候变化的最主要原因，成为人类面临的重大环境挑战。

习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布我国力争于 2030 年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取 2060 年前实现碳中和。水泥是国民经济建设重要的基础原材料，随着我国经济社会发展进入新阶段，水泥作为资源型产业，资源、能源、环境要素已成为其主要制约因素。全国新型干法水泥生产线累计共 1609 条，比 2019 年增加 10 条；设计熟料年产能 18.3 亿吨，熟料产量为 15.79 亿吨。其中安徽、四川、山东、广东 4 省的产能均超过一亿吨。

在双碳目标下，水泥行业作为我国碳排放较大的行业之一，对于水泥行业的碳排放结构来说，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(干法)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。

燃烧前捕集是指在燃料燃烧前，采用高压和高温并且必须控制空燃比，将化石燃料分

解成一氧化碳和氢气，再冷却后进行催化重整反应，生成含有氢气和二氧化碳的水煤气（二氧化碳含量为 10%-40%），然后对水煤气进行压缩提纯氢气并分离出二氧化碳，最后产生用于燃烧的纯净氢气。燃烧前捕集的相关技术主要应用在整体煤气化联合循环系统（IGCC）中。

燃烧中捕集就是富氧燃烧技术的应用，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，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，从而在二氧化碳浓度为 60%以上的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。另外需要采用空气分离设备获取纯氧。

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。

其中燃烧后捕集的吸收法还可以分为物理吸收法和化学吸收法。

物理吸收法是以亨利定律为原理，即随着压力、温度变化会改变二氧化碳在溶液中的溶解度，从而实现二氧化碳的吸收和解吸。在工业应用中，首先进行加压或降温的操作，让二氧化碳溶解在溶液中被吸收之后，再进行减压或升温操作来改变条件，将二氧化碳分离。该法大多在低温高压下进行，溶剂对于二氧化碳的吸收效果较好且更加适用于当二氧化碳的分压高的烟气中，但在使用过程中烟气中的硫化物容易污染吸收液，导致吸收液的再生能力降低。对于物理吸收法中的吸收剂的要求是选择性好、对二氧化碳溶解度大的有机溶剂，目前常用的吸收剂有水、聚乙二醇二甲醚、碳酸丙烯酯、甲醇和乙醇等。

化学吸收法的原理是使用液相溶液将烟气中易溶于吸收液的成分，通过化学反应选择性地脱除。化学吸收法吸收二氧化碳是指使用具有碱性的化学吸收液通过与二氧化碳发生化学反应来吸收二氧化碳，在吸收的过程中生成不稳定的盐类，再将其送入再生塔中，通过加热不稳定的盐类物质可以分解释放二氧化碳，从而得到较高浓度的二氧化碳，吸收剂再生之后送入吸收塔继续进行吸收。目前比较常用的吸收剂包括氨水溶液、钙基吸收液、碳酸钾溶液、强碱溶液、有机醇胺溶液等。化学吸收法的优点在于，对于二氧化碳分压较低的烟气具有良好的吸收效果，吸收速率快，效率高，且碱性的吸收剂对于硫化氢、二氧化硫也有吸收效果。该法的缺点是吸收剂的再生所需能耗高，再生之后的吸收剂对于二氧化碳的吸收效率下降，可以循环利用的次数少。总的来说化学吸收法由于其具有吸收效率高，处理能力大的特点，适合应用于水泥、发电、钢铁工业等大规模碳捕集。

1.2 标准化现状

与采用化学吸收法捕集二氧化碳的相关标准可以分为三类，分别是工程的设计标准、装备标准、运行和调试规范标准。

（1）设计标准明确了烟气二氧化碳捕集纯化在建设前期的规划，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，二氧化碳的来源包括火电厂、水泥厂、钢铁厂、石油化工等企业有化石燃料燃烧形成的烟气。如：GB/T51316-2018《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》。

（2）装备标准明确了燃煤产生烟气中的二氧化碳捕集工艺所需装备。也包括燃气、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工艺所需装备。如：JB/T12909-2016《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》、JB/T13413-2018《燃煤烟气二氧化碳储存装备》

(3) 运行和调试规范标准明确了燃煤烟气碳捕集装置运行和调试的具体操作步骤和流程,并规定了安全运行调试相关内容。如:JB/T12535-2015《燃煤烟气碳捕集装置调试规范》、JB/T 12536-2015《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》。

1.3 标准任务来源

在 2000 年到 2014 年间,我国水泥熟料产量从 5.97 亿吨增长至 24.76 亿吨,年均增长率 10.8%。2014 年以后总体一直保持着 23 亿吨左右的产量。占全球产量的 58%,并连续 36 年位居世界第一。据统计利用现有的新型干法水泥生产工艺,每生产 1 吨水泥熟料将向大气排放 0.86-0.9 吨的二氧化碳气体,每生产 1 吨水泥向大气排放 0.6-0.65 吨的二氧化碳气体。分析单位水泥碳排放的构成与减排潜力,生产 1 吨水泥过程中,其中生料煅烧石灰石分解二氧化碳约 370kg,熟料耗煤排放二氧化碳约 190kg,扣除余热发电的综合耗电折算碳排放约 47kg。产量巨大的水泥的生产会产生出巨量的二氧化碳温室气体。水泥工业面临的碳减排压力非常严峻,任务非常艰巨。

海螺集团作为水泥行业的龙头企业,率先开展碳捕集、生物质替代燃料、富氧燃烧等多种低碳技术开发和应用,积极响应中国建材联合提出“水泥等行业要在 2023 年前率先实现碳达峰”的倡议,大力推进碳减排工作,为水泥行业提前实现碳达峰碳中和目标做出积极贡献。

海螺集团于 2018 年 4 月,在安徽海螺水泥股份公司白马山水泥厂 4000t/d 水泥熟料生产线,建成了世界首条二氧化碳捕集规模为 5 万吨/年的示范项目,项目的成功开发为公司在碳捕集与利用领域发展奠定基础,开创了世界水泥工业回收利用二氧化碳的先河,突破了水泥行业碳捕集技术“零”应用,标志着水泥工业环保技术取得新的巨大进步,对全国乃至全球水泥行业二氧化碳捕集利用技术都具有较大的引领和示范作用;

该项目进行技术应用示范后,目前国内外尚无适用于水泥窑的烟气二氧化碳捕集纯化的同类标准,至今也未在行业内形成技术标准和规范,不利于该技术在行业内的全面推广应用,不利于水泥行业低碳技术的发展和提前实现碳达峰的目标要求。

根据《工业和信息化部办公厅关于印发 2021 年碳达峰碳中和专项行业标准制修订项目计划的通知》(工信厅科函[2021]291 号)要求,由建材工业综合标准化技术委员归口管理,由安徽海螺集团有限责任公司等单位负责《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》的标准起草工作。

1.4 标准制定的目的、意义

碳捕集纯化技术可以捕集大量的尾气排放中的二氧化碳,这种技术被认为是未来大规模减少温室气体排放、减缓全球变暖可行的技术之一。水泥行业作为碳排放大户,存在工艺过程排放量大、源头减排有限等特点,在碳减排道路上任重道远。同时行业上国际国内尚无水泥窑碳捕集有关技术规范,亟需建立碳捕集技术规范体系,指导水泥企业建设碳捕集项目,进一步推广应用碳捕集技术,规范碳捕集技术的推广应用和项目的建设运行管理。因此,制定该标准有利于水泥行业加快水泥窑烟气碳捕集纯化技术成果的推广应用,更好的推进水泥窑碳捕集规模化发展,为实现国家碳达峰、碳中和政策提供有力支持。

1.5 与相关标准的关系

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。

《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》主要是对采用化学吸收法的水泥窑烟气二氧化碳捕集工艺进行规范，该行业标准适用的烟气是来自于水泥窑。侧重于化学吸收法的工艺系统，更加详细地规范了各子系统的设备构成、技术参数与过程控制，其中子系统包括：烟气处理系统、二氧化碳吸收系统、二氧化碳解吸与吸收剂再生系统、二氧化碳纯化系统、二氧化碳储存系统。《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》是对《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》在水泥窑及建材窑炉中采用化学吸收法捕集二氧化碳的详细补充。

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解决方法进行了分析，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。

《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》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，虽然这三个标准均有对采用化学吸收法的二氧化碳捕集工艺和运行参数的规范，但侧重点不一样，《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》侧重于化学吸收法的二氧化碳捕集的工艺系统，对工艺设备设计要求和材质要求进行了规范。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。而《燃煤烟气碳捕集装置运行规范》和《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》重点关注设备运行的操作规范和对装备以及为装备配置必要的热工控制、电气系统、建筑结构等方面的规范。

《Carbon dioxide capture – Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry》ISO/TR 27922:2021，主要是技术综述，综述了现有的二氧化碳捕集技术的原理以及进展情况，包括有机胺吸附、变压吸附、膜分离、直接物理分离、钙循环、富氧燃烧等。此外分析了评估应用何种二氧化碳捕集技术的影响因素，并通过案例分析对各种碳捕集技术经济性进行了评估，得出碳捕集关键绩效指标。该标准没有对碳捕集技术的工艺路线、选择原则、技术参数等进行规范，只是对多种碳捕集技术作出详细的介绍，并讨论了相关技术选用的评价方法。与本文件《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》存在本质上的区别。

1.6 起草单位

本文件由安徽海螺集团有限责任公司负责起草，安徽海螺建材设计研究院有限责任公司、安徽海螺水泥股份有限公司白马山水泥厂、中碳（安徽）环境科技有限公司、大连理工大学、大连理工大学洛阳研究院、大连市化工设计院有限公司参与编制。

1.7 主要工作过程

1.7.1 前期准备

(1) 海螺集团于 2016 年启动二氧化碳捕集项目，开始对国内外碳捕集技术进行广泛调研，并于 2018 年建成水泥窑碳捕集项目。

(2) 根据建材联合会安排，于 2021 年 10 月成立水泥窑烟气碳捕集技术规范编制组，启动标准编制工作。

(3) 编制组于 2021 年 4 月完成《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》初稿编制，并征求相关单位意见。

1.7.2 开题论证

(1) 2021 年 12 月标准立项，编制组编制《水泥窑烟气二氧化碳捕集技术规范》开题论证报告。

(2) 2022 年 4 月 21 日通过了中国建筑材料联合会组织的标准开题论证会。

(3) 2021 年 6 月，编制组进一步充实编制组成员，根据开题论证会专家意见，进一步修改完善标准草案内容。

二、标准编制原则

2.1 协调性

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 1.1-2000《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写规则》、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

本文件围绕行业水泥窑绿色低碳发展的先进技术、装备、管理等方向要求，并考虑了国内水泥窑碳捕集技术装备、工程建设、运营管理的现状，在水泥窑烟气碳捕集方面，以现有工程化技术装备及其运行管理状况为基础，针对于未来水泥窑化学吸收法捕集二氧化碳的技术发展方向。

2.3 先进性

本文件是对采用化学吸收法的水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化的工艺设计、装备制造、工程建设与运行管理提出了一系列规范性要求，针对于水泥窑烟气中的二氧化碳浓度低、污染物浓度高、成分复杂、烟气量大等特点，进行了一系列的工艺、装备、运行流程的改造，克服了由于烟气成分所造成的胺液损失量大、运行能耗与成本高、工程造价昂贵等问题，在水泥行业中保持了采用化学吸收法的水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术的先进性。

2.4 统一性

以 GB50295《水泥工厂设计规范》、GB/T51316《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、标准主要内容

3.1 范围

该部分规定了标准使用的范围。

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

该部分主要规定了包括化学吸收剂、解吸、富液等在内的 7 个术语和定义。

3.4 系统要求

3.4.1 系统构成

该部分介绍了二氧化碳捕集系统构成，每个系统主要含有的系统及设备等。水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化装置主要包括烟气预处理系统、二氧化碳吸收系统、二氧化碳解吸及吸收剂再生系统、二氧化碳纯化系统、二氧化碳储存系统。

3.4.2 系统性能

1、水泥窑烟气具有气体处理量大、二氧化碳分压低、杂质含量较高等特点，目前从水泥窑烟气中分离二氧化碳的技术主要有化学吸收法、物理吸收法、膜分离法、吸附分离法、低温分离法等技术。有关研究表明：

（1）物理吸收法选择性差、回收率低、经济性不佳、运行成本和能耗都比较高；

（2）吸附法原料适应性广，无设备腐蚀和环境污染，工艺过程简单，能耗低，压力适应范围广，但吸附解吸频繁，自动化程度要求高，需要大量的吸附剂，更适合于二氧化碳浓度为 20~80% 工业气；

（3）膜分离法装置紧凑，占地少，且操作简单，具有较大的发展前景。其缺点是目前的膜材料对二氧化碳的分率较低，难以得到高纯度的二氧化碳；

（4）低温分离法需要低温操作，分离效果较差，比较适应于高浓度（含量 60% 以上）的二氧化碳回收；

（5）化学吸收法虽然存在吸收剂在循环过程中损失较大、再生能耗较高等缺点，但经有关研究表明，针对水泥窑烟气，化学吸收法是上述几种分离方法中经济性最好的一种方法，同时通过调研发现，国内外已建成的烟气二氧化碳捕集装置均采用的是化学吸收法，故此处推荐选用化学吸收法。

2、本文件规定的化学吸收法主要适用于二氧化碳浓度为 $\geq 15\%$ 的水泥窑烟气，若采用二氧化碳浓度 $< 15\%$ 的水泥窑烟气，经济性将下降。对于引入富氧燃烧技术的水泥窑烟气可考虑采用变压吸附等方法，降低捕集成本。

3、在碳达峰碳中和国家战略目标背景下，水泥窑烟气碳捕集技术应先进成熟，绿色环保，贯彻循环经济理念，对捕集来的二氧化碳产品综合利用，助力建材行业早日碳达峰。

4、二氧化碳捕集纯化车间应严格遵守国家相关安全生产规定，满足环境保护、职业安全卫生和污染源排放要求。

5、水泥窑系统和碳捕集系统应进行有效衔接，全过程应将水泥窑系统和碳捕集系统同步运行，实现智能化控制，体现先进制造理念，提高生产效率。

6、水泥窑烟气二氧化碳捕集率不宜低于 90%，捕集后的二氧化碳浓度不宜低于 95%。

7、碳捕集与纯化系统总能耗不宜高于 143.4 kgce/tCO_2 (4.2 GJ/tCO_2)；捕集系统能耗不

宜高于 119.6kgce/tCO_2 (3.5GJ/tCO_2)；纯化系统能耗不宜高于 23.8kgce/tCO_2 (0.7GJ/tCO_2)。其中捕集系统能耗，包括烟气预处理系统、二氧化碳吸收系统、二氧化碳解吸及吸收剂再生系统所消耗的能量。纯化系统能耗是二氧化碳纯化系统、二氧化碳储存系统所消耗的能量。

经调研《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》GB/T 51316 规定的捕集系统能耗为 4.2GJ/tCO_2 ，且国内已建成装置的捕集系统能耗基本在 3.9GJ/tCO_2 到 4.2GJ/tCO_2 。而在安徽海螺水泥股份有限公司白马山水泥厂，建成的年捕集量为 5 万吨的水泥窑烟气二氧化碳捕集装置，长期运行过程中，捕集系统能耗为 3.5GJ/tCO_2 以下。为了保证该关键指标的先进性，故此处捕集系统能耗指标定为 3.5GJ/tCO_2 。同时，纯化系统能耗指标设定为 0.7GJ/tCO_2 也是在长期运行过程中确定的。

8、捕集纯化装置的操作弹性宜取设计能力的 50%~120%。

9、水泥窑炉烟气经过捕集浓度提升到 95%后，纯化系统的二氧化碳纯化回收率不应低于 90%。

3.5 系统工艺与装备

系统工艺与装备部分对二氧化碳捕集与纯化系统中每个子系统进行了描述，同时对压力容器、塔式容器、换热器、阀门等设备的设计和材质进行了规定，规定了工艺与装备要求，以保证设备和系统的质量。

3.5.1 一般要求

1、胺基溶液吸收法具有高反应速率、经济性好且净化度高等优点。在燃煤电厂、石化行业的低浓度二氧化碳烟气中有广泛应用，为水泥窑烟气碳捕集起到了很好的借鉴作用，因此，本文件规定一般采用胺基溶液吸收法进行碳捕集。同时，选用的化学吸收剂应具备以下特点：

二氧化碳吸收能力较强、吸收速率快、腐蚀性小、不易降解、不易发泡，能够回收利用等。通过对化学吸收剂各方面性能特点进行约束，最大程度上降低吸收剂能耗。

2、水泥窑烟气二氧化碳捕集装备应遵循水泥厂设备安装要求，符合 GB 50295 的规定。

3、为保证碳捕集系统稳定运行，应选择两个泵，采用一用一备模式，避免特殊情况发生。

4、阀门非金属密封材料的选择应考虑二氧化碳介质的腐蚀性；

5、塔式容器的设计压力应为微正压。

6、碳捕集工艺设计较为复杂，应从工艺参数、设备和材料多方面进行考虑，设计出较为合理的工艺系统，同时满足水泥熟料生产要求。碳捕集系统的引入不对水泥窑系统造成干扰，应保证水泥系统安全平稳运行。

7、目前，全球水泥行业只有一套 5 万吨/年的较大工业规模的碳捕集装置在运行，企业位置在白马山水泥厂。正在建设的是在唐山燕南水泥（竞鼎），也是 5 万吨/年产能。

3.5.2 烟气预处理系统

烟气预处理系统，是将窑炉烟气通过引风机送入水洗脱硫塔底部，在塔内进行降温除尘、溶剂脱硫净化、脱硫水洗三个阶段，把烟气中的粉尘、硫化物和氮氧化物杂质净化去除。主要包括引风机、水洗脱硫塔、烟气降温水洗泵、脱硫泵、脱硫水洗泵、脱硫液配制罐、硫化物中和回收反应罐、脱硫液再生循环泵、降温水洗罐、塔顶烟气水洗罐、脱硫液罐等设备。

1、烟气预处理系统主要目的是对进入吸收塔的烟气进行预处理，使其满足吸收塔要求。烟气中含有较多的粉尘、颗粒物以及硫化物、氮氧化物等，应对烟气进行降温除尘、

脱硫脱硝，降低硫化物和氮氧化物等杂质含量，使出口烟气满足吸收塔烟气要求。

2、预处理塔的压力宜设置为常压，温度宜设置为 40~60℃。以保证最佳的脱硫脱硝效果。

3、水洗脱硫塔的降温水洗段用系统的循环冷却水，进水温度 32~35℃，保证把进入脱硫段的烟气温度降低到 40℃ 左右，冷却水从塔底排出，经过烟尘的沉降池后把夹带的粉尘沉降分离，清水引到冷却水系统降温后，再进入水洗塔内循环使用。水洗脱硫塔中间段用对硫化物有高选择性吸收能力的脱硫液，从上而下对烟气进行洗涤，把 SO₂ 和 NO_x 通过化学反应吸收，从塔中间段引出进入中和罐，用空气和氧化钙进行中和，使硫化物变成硫酸钙固体沉降，从中和罐引出进行分离，固体硫酸钙作为副产品回收，脱硫液被还原，重新循环回脱硫塔中使用。在中和罐中同时加入另一种中和剂，把 NO 氧化成 N₂ 直接排空，达到同时脱硫脱硝的目的。水洗脱硫塔的上段用洗涤水对烟气进行洗涤，避免脱硫液被烟气带入后续的化学吸收塔中。脱硫塔塔顶层有除沫器阻止液体夹带进入气体。

4、预处理系统的烟气的进口和出口均应设置取样口，以便对烟气中的 CO₂、N₂、NO_x 以及 SO_x 等组分含量进行定期监测，保证工艺安全稳定运行，使进入吸收装置的气体杂质含量满足要求。

5、预处理塔设置在引风机之后，因此预处理塔采用正压操作效率会更高，但是压力不宜过大。引风机排气量一般有 10% 的裕量。

3.5.3 二氧化碳吸收系统

1、二氧化碳吸收系统的核心是吸收塔。二氧化碳吸收系统是利用化学吸收剂对烟气中二氧化碳进行吸收的系统。二氧化碳吸收剂从塔内上部进入并均匀分布往下流入，同时下部引入的气体匀速上升，并在规整填料的作用下达达到最大面积逆流接触和快速传质的目的。吸收了二氧化碳的溶液作为富液从塔底引出，由富液泵送去解吸塔。由于二氧化碳吸收剂很容易受气体中硫化物、氮氧化物、氯化物等影响导致失去活性，所以进入吸收塔的烟气必须符合相关规定。

2、为避免硫化物、氮氧化物、氯化物、颗粒物等杂质含量过高对吸收塔造成较大负担，导致吸收剂失活、二氧化碳捕集纯化回收率低，能耗高，对进入吸收塔的烟气杂质含量进行了规定。结合脱硫液、吸收塔的性质以及水泥厂实际情况，规定进入吸收塔的烟气：粉尘含量不宜大于 5mg/Nm³；SO₂ 含量不宜大于 10mg/Nm³；NO_x 含量不宜大于 50mg/Nm³。

3、吸收塔作为整个碳捕集系统的核心，工艺参数的监测十分重要。应定期对进入吸收塔的烟气温度和流量进行检测，保证进入吸收塔的烟气物理指标符合设计要求，工艺系统能够稳定运行。出了吸收塔的烟气应再次进行检测，主要检测内容包括 pH、杂质含量等，以便掌握二氧化碳的捕集率，对吸收剂吸附性能和塔内运行情况做到及时监控。

4、由于二氧化碳捕集能耗非常高，所以在工艺设计过程中应注意能量的回收，贯彻循环经济理念，这对于降低碳捕集成本至关重要。选择高效的换热器和设置贫富液换热器是两种重要的能量回收方式。一般来说，贫富液热交换器、贫液冷却器均可选用板式换热器，板式换热器的冷端温差不宜小于 3℃，不应大于 100℃，冷热流体之间的压差不应大于 2.0MPa；也可以采用管壳式换热器，但是冷端温差不宜小于 8℃。

5、塔器按其结构可分为两大类：板式塔和填料塔。

(1) 板式塔的研究起步较早，尽管与填料塔相比，板式塔具有效率较低、通量较小，压降较高、持液量较大等缺点，但由于其具有结构简单、造价较低、适应性强、易于放大等优点，因此，板式塔在 20 世纪 70 年代很长段时间里占有统治地位；

(2) 填料塔的技术，基于 20 世纪 70 代初期出现的世界性能源危机，迫使其近年来取得了长足的发展由于性能优良的新型料相继问世，特别是规整填料及新型塔内件的不间断

发应用和基础理论研究的不断深入，使填料塔的放大技术有了新的突破，改变了以板式塔为主的局面。

当前在选择塔型时，主要考虑的重点往往是处理能力和分离效率，对于烟气吸收解吸过程而言，由于物理吸收过程效率较低，且烟气及吸收溶液均有一定的腐蚀性，因此更宜选择填料塔。目前国内及国际上建造的几套烟气二氧化碳捕集装置中，吸收塔和再生塔均选用的是填料塔，因此，本文件塔器选用时推荐填料塔。

6、化学吸收塔塔体、化学溶液储罐、配碱罐、配胺罐可以采用碳钢制作，和液体接触的部位用鳞片胶泥进行三遍涂装，避免设备腐蚀。

7、吸收塔烟气进口管道应设温度和流量监测，烟气出口管道上应设取样口。贫富液泵的出口流量应该满足产量所需的流量要求。吸收塔的空塔气速不应超过 1.5m/s。

3.5.4 二氧化碳解吸及吸收剂再生系统

1、吸收剂再生系统核心是溶液解吸塔。吸收了二氧化碳的富液在塔内从上部进入并均匀分布向下流动、在规整填料的作用下，遇到塔底上升的蒸汽被逐层加热后，二氧化碳从溶液中解吸并从塔顶排出，解吸了二氧化碳后的溶液作为贫液从塔底引出，由贫液泵送到贫富液换热器换热、并经过贫液冷却器用水冷却后，返回到吸收塔溶液系统循环使用。由于整个过程解吸塔塔顶温度较高，因此应在塔顶出口管道设置温度检测及高低温报警。为避免塔顶带出更多水分，增大系统能耗，再生塔一般采用微正压操作。

2、装置经过长时间运行，不可避免地会有杂质产生，从而影响吸收液的质量，进而影响设备长期高效的运行。因此，在贫液管线的旁通路上设置过滤装置。通常选用活性炭过滤器，用以去除溶液中降解的絮凝物杂质以保持溶液的清洁度。活性炭过滤器使用时不超过 10%的胺液循环量。还可以在溶液泵的入口设计机械过滤器，便于滤掉溶液中的固体机械杂质。

3、考虑到化学吸收液要有缓慢降解并生成不可逆废物，要定期从系统中排出降解废物，此过程会带走少部分活性胺液。所以要设计一台胺液回收器，用蒸汽把胺液重新蒸发返回到再生塔内部重新使用。进入胺回收加热器的溶液流量控制在 0.1%以内，胺液降解量少时不必要连续开启，有时要用微量强碱液调节 PH 值后再排放粘稠状废液。

4、二氧化碳解吸及吸收剂再生系统是对富液进行再生将吸收剂变成贫液，并解吸出二氧化碳，同时对吸收剂进行脱除有害离子杂质的系统

3.5.5 二氧化碳纯化系统

1、从水泥窑等各类窑炉排出来的烟气中，有燃料燃烧过程产生的多种杂质，也有矿石分解过程产生的杂质。再经过二氧化碳捕集过程时，又会带来化学溶剂挥发出来的杂质，所以组分非常复杂。二氧化碳纯化系统的作用是将解吸塔排出二氧化碳气体进行压缩、干燥、脱硫、吸附、精馏、冷却、液化、储存，使二氧化碳达到工业级、食品级或其他要求。

2、一般解吸塔出来的气体应排空一段时间，检测到二氧化碳纯度大于 95%以上时才能进入到二氧化碳纯化系统。

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、在二氧化碳产品产量小于 50t/h 时，或者是要求高压时，建议压缩机采用活塞压缩型式，但最高不要超过 7.0MPa。气量大或者高压情况下要做好震动平衡的设计或者有减震

设施。是否采用或不用备机由具体情况确定。在不用备机时，二氧化碳产品罐设计要考虑到压缩机停车维修期的储存容量；当压缩的气量大于 50t/h 时，可以采用离心式压缩机。

5、螺杆式压缩机在没有彻底解决出口气体含油（尤其是气态油污）的问题时，不允许采用螺杆式压缩机。

6、二氧化碳净化包括脱硫系统、干燥系统、吸附系统

7、对于脱硫过程，烟气中的硫化物虽然经过脱硫塔和吸收塔后，还会有微量成分被带入二氧化碳气体中。食品级产品要求总硫含量小于 0.1ppm，所以必须用固体脱硫剂将其吸附净化才能达标。硫化物有 SO₂、H₂S、COS、CS₂、硫醇和硫醚等多种，所用脱硫剂必须是用有针对性和高选择性的材料制作，并且使用过程中能用加热的再生气体进行再生而反复使用。选用的脱硫剂不得污染产品。

8、对于干燥过程，经过捕集装置后二氧化碳气体含有饱和水，维修后的压缩机短时间内也会有油污被带入气体中。食品级标准要求水含量是 20ppm 以下，所以必须用大吸附量高选择性的固体吸附剂才能吸附达标。目前市面上常用的吸水硅胶、大孔分子筛和氧化铝虽然能吸水，但是都因吸附深度不够而不能达标，并且再生时容易脆裂和粉化。干燥剂也必须能用再生介质加热再生而反复使用，正常使用寿命要大于 4 年。有的小孔分子筛遇到二氧化碳弱酸后会被慢慢腐蚀而粉化，要注意规避使用。

9、对于吸附过程，二氧化碳气体会带入煤或重油燃料燃烧产生的氧化物和稠环芳烃，矿石分解过程释放的磷化物或者微量汞砷铬铅重金属，也会有微量的有机胺残存，所以要用专用固体吸附剂把这些微量杂质全部吸附除尽，才能使产品达到无色无味的食品级标准。

10、当生产灭火、铸模、碱中和等行业使用的工业级二氧化碳产品时，可以按照 GB/T6052 的标准要求，简化干燥床和吸附床中不作要求的相关杂质吸附剂，也可以把有用的吸附剂装填在干燥床中，省去吸附床系统。

11、气体中有时会有 CO、O₂、N₂、Ar 等沸点很低的轻组分气体。当用天然气作燃料时也会有微量 H₂ 和 CH₄。这些气体在二氧化碳液化过程中会在液体中有微量溶解残留，而标准要求最高含量都小于 30ppm，所以这些气体杂质要用精馏塔分离除尽。经过用非理想物系模型精确设计的精馏塔再结合热泵精馏技术，就可以把这些气体从塔顶分离得很纯净。精馏塔采用不锈钢填料，分精馏段和提馏段，塔底用热源加热，便于赶出去溶解在液体二氧化碳中的轻组分杂质；塔顶要设计立式列管式冷凝器，引用外来冷源降温，便于把轻组分气体带出去的气态二氧化碳冷凝，直接回流到精馏塔顶，提高二氧化碳的纯化回收率。由于轻重关键组分沸点差大于 83℃ 以上，所以分离轻组分气体只用单塔精馏就可以，不需复杂的双塔精馏和塔顶气体自冷却的不成熟精馏技术；也不需用复杂的塔顶体外第二液化器。

12、捕集纯化后的二氧化碳为气体状态，必须进行液化，才能满足运输和产品要求。

13、在经过几步吸附过程把气体中的重组份杂质净化干净以后，要把二氧化碳气体液化。液化过程要用液化器来实现。液化温度取决于系统压力，在压力高于 6.5MPa 以上时，用 20℃ 的低温冷却水或者低温空气就能够使二氧化碳液化。但目前行业规定一般都在中压 2.5MPa 压力下操作运行，在此压力下二氧化碳在 -12℃ 温度下液化，这就需要有 -15℃ 以下的冷源来保证液化。当压力超过 7.28MPa 的二氧化碳临界压力时，将会二氧化碳导致无法液化。常用的低温冷剂有氨 R177、氟利昂 R22、R134a 和 R507 等多种，可以直接引用，但不能混合使用；也可以用低温乙烷、丙烷、乙烯、丙烯等现有的液体冷剂。这些冷源都要经过一定的压力和冷却条件才能获得。

如果使用液氨或者环保型氟利昂作制冷剂，则要经过专用的压缩机对气态冷剂增压，在空气或者冷却水作用下使气态冷剂液化，经过调节阀降压后使对应的温度下降，通过液

化器传热后使二氧化碳液化。制冷机所用的压缩机可以是活塞式或者是螺杆式。

14、二氧化碳液化要在特制的液化器中实现，液化器可以是列管式、U形管式、立式或者是板式。二氧化碳气体在液化器里吸收冷量后逐渐液化，连同轻组分不凝气一起流出，进入下一个分离环节。气液两相分离可以用分离罐（工业级产品）或者精馏塔系统（食品级产品）来进行。低温冷剂在液化器另一程中吸收热量后被气化，经过气液分离罐后，再返回到制冷压缩机的入口循环使用。

3.5.6 二氧化碳储存系统

1. 二氧化碳储存过程，是将捕集纯化后的二氧化碳转移至储存罐的系统。液体二氧化碳储罐的形式有多种，立式或卧式储罐一般为双层固定真空珠光砂保温储罐(贮槽)。内胆材质采用 16MnDR 低温容器钢, 外胆材质为 Q235B 或者 16MnR。对于小于 250m³ 的双层罐，其内胆应用整体电炉加热消除金属热加工过程产生的内应力。当液体储罐体积大于 250m³ 时，大体积整体消除应力的电炉建造困难，一般都用球罐储存二氧化碳液态产品，材质常用 16MnDR。当体积大于 2000m³ 以上时，采用 16MnDR 所设计的罐壁很厚很重，球罐大都换成机械强度更高的 07MnNiVDR（调质）材质制作，便于减小壁厚进而减轻罐体重量。球罐一般都是出厂前压制成罐瓦，在厂内消除应力后送到现场焊接拼装成型，做好探伤等一系列检测合格后，采用现场聚氨酯发泡保温，厚度按 GB50264 执行，保温外壁与周围大气的温差不超过 2℃。

2. 低温液体储罐规定，液态二氧化碳要在 2.2MPa 和 -17℃ 温度下储存，罐体设计压力是工作压力的 1.15 倍。管内液体的充装系数不能大于 0.9，罐顶要留有气态空间，便于充装槽车时能够和车顶气体进行压力平衡，保证装车过程顺畅。

3. 储罐应设置现场液位和压力显示仪表，同时也要有液位、压力、温度远程显示、调控仪表和报警系统，并自动联锁释放阀开启措施；高液位报警和低液位报警可联锁储罐出口切断阀。罐体系统有全启封闭式安全阀及备用安全阀，备用安全阀的泄放能力不应小于主安全阀的泄放能力；安全阀与储罐之间应设切断阀，切断阀在正常操作时应处于铅封开启状态；储罐进出口管道应设置可远程操作的切断阀；为了平衡储罐内压力，二氧化碳储罐底部可设自增压用汽化器，汽化器的设计压力不应低于储罐的设计压力；汽化器的汽化能力应满足泵的正常运行要求；汽化器出口应设调压阀。

4. 液态储罐系统都设计有装槽车的液体泵，由于槽车内也有压力，所以装槽车的液体泵只需要补充地面到槽车高度差的静压力扬程就可以，一般选用 50m 扬程的屏蔽电泵；装槽车过程中必须把槽车和屏蔽泵之间的耐压软管连同，同时也要把槽车顶部与储罐顶部之间的气相平衡软管接通。为了便于充装槽车时能够和车顶气体进行压力平衡，保证装车过程顺畅，二氧化碳储罐内液体的充装系数不能大于 0.9，罐顶要留有气态空间。

装钢瓶要有事先安装好的汇流排，在主管道上均布带阀门的钢瓶软管接口，每个装瓶位置地下安装有称重的地秤，准确称取装瓶重量。汇流排的主管道上安装有现场指示的压力表、安全阀和自动排放设施。当装填钢瓶时，由于钢瓶在常温下有 5.0MPa 以上的压力，所以装钢瓶的液体泵必须用柱塞式低温液体泵，出口压力要高于 6.0MPa。

3.5.7 系统参数检测与过程控制

1. 碳捕集与纯化系统应设置自动检测及控制系统。有毒气体应符合国家现行标准规定。

2. 碳捕集与纯化系统的主要参数应进行实时测量及显示，最基本测量显示控制的参数有流量、温度、压力及液位。本部分对碳捕集系统中涉及到的参数检测点及检测频率进行了规定。操作者应遵守检测规定，遇到参数异常情况及时进行工艺调控，保证碳捕集系统正常稳定运行。

3. 过程控制是对水泥窑系统和碳捕集控制系统及系统类型进行规定，对系统的热工参

数、服务器配置、热工保护系统应遵循的原则等进行了详细描述。

3.6 安全与职业卫生

3.6.1 安全

1. 碳捕集涉及到的特种设备较多，比如各种压力容器、压力管道，要严格按照特种设备管理规定进行操作和使用，保证生产安全。

2. 二氧化碳压缩冷却过程中，若采用液氨为冷却媒，则应考虑液氨防护措施。

3. 二氧化碳捕集纯化过程中使用到的化学危险品包括：二氧化碳、乙醇胺、三乙醇胺、哌嗪等有机胺类、液氮等，应根据其性质分类储存使用。

3.6.2 职业卫生

1. 职业卫生相关防护措施应符合 GBZ 1 的要求。

2. 二氧化碳捕集纯化过程系统噪音较大，应考虑降噪处理，噪音防护应符合 GB/T 50087 的有关规定。巡检的工作人员也要携带个人噪声防护器保证个人安全。

3. 车间应配有事故淋洗器和洗眼器等防护器具，保证事故发生时能进行及时处理，最大程度上减少人员伤害。

3.7 项目建设及验收

3.7.1 一般规定

1. 项目建设单位在建筑工程开工前必须取得建筑工程施工许可。是为了加强建设行政主管部门对工程项目实施的监督管理，维护建筑市场秩序，保证工程项目的质量和安全。

2. 施工项目现场的不安全的因素和隐患众多，为保证施工过程的安全，需要专职的安全管理组织和合格的安全管理人员作为最基本的安全保障措施。

3. 承担工程的单位应取得相应的资质，并在资质许可范围内从事相应工作，是为加强建设工程质量管理，防止和减少事故，保障人民生命财产安全、人身健康、环境保护、能源资源节约和其他公共利益，促进经济发展，国家相继制定了《建设工程安全生产管理条例》、《建设工程质量管理条例》、《特种设备安全监察条例》等行政法规，均对生产经营单位的执业范围做了规定，生产经营单位必须取得相应的资质并在资质等级许可的范围内从事生产经营活动。

4. 压力管道是《特种设备安全监察条例》规定进行安全监察的特种设备，本条规定符合《压力管道安全管理与监察规定》第十五条，即“第十五条从事压力管道焊接的焊工和无损检测的检验人员，必须按有关规定取得劳动行政部门颁发的特种作业人员资格证书。”的要求，现在由特种设备安全监察机构具体实施。

3.7.2 项目建设

1. 工程施工中使用未经计量检定的不合格的器具、仪器仪表和设备，会给工程质量带来严重后果，给企业造成经济损失；计量器具必须是根据计量法规定的、定期计量检验合格，且保证在检定有效期内使用；计量器具的精度要与质量检测标准精度相匹配。

2. 安装过程涉及到多专业协同作业，除符合设计文件和本文件要求外，为保证安装的质量，也应符合相应专业技术文件要求。

3. 在工程项目中一些分部分项工程的危险性比较大，对于此类工程需要施工单位提前编制专项的施工方案，以保证施工技术方案合理，安全保证措施充分，保证施工过程的安全性，有效防范生产安全事故。设备在安装过程中，有一些特殊的要求，也是保证安装精度和质量的前提条件。这些特殊要求要得到充分保障。

4. 起重设备的吊装过程是发生问题和事故较多的工序。大型、特殊、复杂的起重设备和特殊、复杂的环境对起重设备吊装的难易程度和安全性的影响极大，故强调必须制定完善的吊装方案，目的是防止事故的发生。而对大型、特殊、复杂的起重设备和特殊、复杂的环境判定，视被吊设备的尺寸、重量、结构形式、易损程度、施工环境和施工单位的施工经历、装备能力、惯用工艺、技术水平、人员素质等因素而定。同样的设备吊装，同样的施工环境，对头一次干的或不经常干的与经常干的判定结果肯定是不一样的。

5. 在工程项目中一些分部分项工程的危险性比较大，对于此类工程需要施工单位提前编制专项的施工方案，并组织专家论证，以保证施工技术方案合理，安全保证措施充分，保证施工过程的安全性，有效防范生产安全事故。

6. 碳捕集与纯化项目中存在一些重载高耸构筑物及沉降控制要求比较高的设备，建成后需要对这些构筑物和设备基础进行沉降监控，保证构筑物及设备运行的安全，需设置监测点便于检测。

7. 隐蔽工程的隐蔽工程是指建筑物、构筑物、管道等在施工期间将建筑材料或构配件埋于物体之后被覆盖外表看不见的实物。明确工程建设中的隐蔽工程，强化施工过程中的质量和规范监督，保障隐蔽工程的施工质量。

8. 隐蔽工程在施工完成后，将被覆盖或遮蔽，一旦出现质量问题，不易进行检查和验证。为保证隐蔽工程的工程质量，在施工过程中须进行过程验收，并通过过程检验、验收文件的签署、留存影像资料等方式进行记录。

9. 管道完成焊接后应按规定进行焊接接头的外观检查 and 无损检测。在检查和检验合格后，在初次运行前，每个管道系统（含连接储罐设备）应进行压力试验，吹洗。应采用无毒气体进行压力试验，严禁采用水介质对液态二氧化碳管道进行压力试验或吹扫。

3.7.3 项目验收

1. 化工投料试车前，建设（生产）单位必须组织进行严格细致的试车条件检查。严格做到“四不开车”，即：条件不具备不开车，程序不清楚不开车，指挥不在场不开车，出现问题不解决不开车。未做好前期准备工作，负荷试车不得进行。负荷试车是项目正常试产的必备工序，检查系统是否满足设计负荷生产要求。

2. 工程建设完成后，经过生产调试，生产系统是否能够达到设计技术指标，需要通过性能测试来进行验证。如不能达到目标值，需要进行整改。生产线性性能测试合格，则可交付生产经营单位组织后续生产。

3.8 运行与维护管理

3.8.1 一般规定

1、碳捕集装置应在满足操作说明书中系统的主要性能指标的条件下运行，保证设备的使用寿命。

2、碳捕集工厂应建立各项管理制度以及设备运行操作规程，操作人员严格按照管理要求进行开车和停车，确保装置稳定可靠运行。

3.8.2 运行管理

1、碳捕集纯化技术含量高、工艺运行复杂，必须专人专职管理。

2、涉及到碳捕集工艺的技术人员、检修人员和运行操作人员在开停车前均应进行技术知识培训和安全培训，培训周期不应少于两个月，从而保证人员牢记技术流程和专业知识，保证设备运行稳定，生产过程安全，产品质量符合既定标准。

3、应将纯化系统液态二氧化碳管道压力控制在 1.3Mpa 以上，以防产生干冰。

4、必须建立开车方案、停车方案及应急预案，每次开停车前应严格按照标准操作规程进行操作，不得随意更改操作流程及操作方法。尤其要注意开停车前设备的全面检查。

3.8.3 系统维护

碳捕集装置中的各大主要设备及配件均应纳入全厂设备管理，应定期对其进行维修和保养，更改或维修必要的部件，做好日常清扫、更换润滑油等工作，保证装置长期稳定运行。

四、主要验证情况分析

本《技术规范》选取了较为典型的水泥窑碳捕集项目进行验证，收集了碳捕集工艺过程中的生产数据，包括系统平均产量、工业级成品浓度、食品级产品浓度、电耗、蒸汽消耗量、预处理塔进口温度、预处理塔出口温度、吸收塔入口烟气温度、吸收塔塔顶温度、吸收塔塔底温度、吸收塔出口二氧化碳浓度、贫富液换热器贫液温度、贫富液换热器富液温度、解吸塔塔顶温度、解吸塔塔底温度、解吸塔出口二氧化碳浓度、补充胺液质量、干燥床出口二氧化碳浓度、吸附床出口二氧化碳浓度、二氧化碳纯化回收率、噪声等直接调研的清单数据，生产数据采用企业现场调研的方式获取，数据统计时间周期为 2020 年 7 月至 2020 年 12 月，收集到的原料消耗与能源消耗数据以声明单位进行核算。各项指标见下表。

表 1 水泥窑碳捕集主要技术指标

工艺参数	单位	参数/工况	备注
系统平均产量	t/h	6.58	
工业级成品浓度	%	99.97	
食品级产品浓度	%	99.99	
电耗	kwh/tCO ₂	240.05	
蒸汽消耗量	t/tCO ₂	1.49	
蒸汽温度	°C	130	
蒸汽压力	MPa	0.3	
蒸汽能量	GJ/tCO ₂	3.43	117.1kgce/tCO ₂
预处理塔进口温度	°C	100	
预处理塔出口温度	°C	33	
吸收塔入口烟气温度	°C	33	
吸收塔塔顶温度	°C	35	
吸收塔塔底温度	°C	52	
吸收塔出口二氧化碳浓度	%	2	质量浓度
贫富液换热器贫液温度	°C	95	
贫富液换热器富液温度	°C	52	
解吸塔塔顶温度	°C	90	
解吸塔塔底温度	°C	100	

解吸塔出口二氧化碳浓度	%	99
补充胺液质量	t/a	10
干燥床出口二氧化碳浓度	%	99.9
吸附床出口二氧化碳浓度	%	99.95
二氧化碳纯化回收率	%	90.96
噪声	dBA	83.47

五、标准中如果涉及专利，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

国际产业化情况，美国是世界上二氧化碳最大的生产国和消费国，其生产能力为 745 万吨/年，主要原料为合成氨厂、制氢厂、石化厂、乙醇厂、天然气加工厂副产二氧化碳。日本二氧化碳生产能力 116.5 万吨/年，市场需求量在 90~100 万吨/年，二氧化碳的来源大致有 5 种：重油脱硫、制氢工厂的副产、合成氨水洗工序的副产、高炉炼铁副产、石化厂副产、酒厂副产。西欧二氧化碳消费量为 160 万吨/年，其中液体二氧化碳占 80%以上，主要用于饮料碳酸化和食品加工。在西欧各国中，德国二氧化碳产量最大，主要利用天然气井分离的二氧化碳。

推广应用论证和预期达到的经济效益：国内二氧化碳消费市场潜力较大。饮料行业消费是国内二氧化碳第一大市场，占 30%左右，随着我国人民生活水平的不断提高，饮料行业对二氧化碳的消费量将会大幅上升。二氧化碳气体保护焊接一直是我国重点推广的技术项目之一，现占二氧化碳消费量的 20%左右，是二氧化碳第二大消费市场，对二氧化碳的用量将一直持续增长，今后 5 年预计年均增长在 11%左右。二氧化碳用作油田助采剂将是一个新的市场增长点。油田对于经过一次采油和二次采油后的油井，可压注二氧化碳对残留地下的石油进行第三次开采。在高压下二氧化碳可渗透入地层的死角和边沿，增加残留原油的流动性并将其驱向油井喷出地面，使回收石油得以强化。二氧化碳在食品加工行业的消费量占国内二氧化碳市场的 15%左右，主要用于食品的冷冻、冷藏、灭菌、防霉、保鲜等，为适应国际食品市场竞争和国内高档食品保鲜的需要，这将是液体和固体二氧化碳潜在巨大市场。二氧化碳和氨是两种常用的烟丝膨化剂，但后者已被列为淘汰禁用品。正逐渐减少使用，最后将被彻底禁用。这给二氧化碳在烟草业的发展提供了不可多得良机，液体二氧化碳用于烟丝的膨化处理，可使每箱香烟节约 5%~6%的烟丝，并可提高烟丝的质量，香烟所需烟丝膨化剂如全部施用二氧化碳膨化处理，则需消耗二氧化碳达 600 万吨，因此，二氧化碳在烟草工业具有十分良好的推广应用前景。

另外，还有不少领域才启动或者正在开发应用，如：用作植物施肥，用二氧化碳可促进农作物生长，提高产量，改良品种。用于超临界萃取，二氧化碳因其安全、价廉、来源广泛、超临界温度和压力低、萃取效率和选择性高而被广泛应用于从香料植物中提取香料，从油料植物中提取油脂，从咖啡豆中提取咖啡等方面。近年来在食品、医药和环境等领域用于许多物质的分离、纯化、监测分析等方面。

七、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技术规范》（以下简称《技术规范》）内容相关的标准，现有 GB/T51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》、JB/T12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》、JB/T13413《燃煤烟气二氧化碳储存装备》、JB/T12535《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》、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》。

本《技术规范》规定了二氧化碳的捕集率不宜低于 90%，相比于 JB/T12909《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》对捕集效率不低于 75%的推荐以及 GB/T51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》对捕集率为不宜低于 80%的推荐，提出了更高的要求，这是基于吸收剂的不断改进，温度控制更加精准，以及烟气前处理效果不断提升，从而提高了吸收剂对二氧化碳的吸收效率。

本《技术规范》规定了二氧化碳的捕集与纯化能耗不宜高于 4.2GJ/tCO₂，这是在国家的“双碳”政策下提出的推荐性指标，在采用化学吸收法捕集二氧化碳的工艺中，相比于 GB/T51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》对捕集能耗不宜高于 4.2GJ/tCO₂的推荐，本《技术规范》规定了二氧化碳的捕集与纯化能耗总和不宜高于 4.2GJ/tCO₂是较为先进的指标。

本《技术规范》规定了进入二氧化碳捕集工艺的烟气指标，明确了烟气温度、粉尘含量、二氧化硫含量以及氮氧化物含量的最高限制，是根据烟气预处理系统和有机胺溶液的特点提出来的，以降低进入吸收塔的烟气中的杂质，对二氧化碳吸收效率以及胺基溶液活性的影响。其他标准无此方面的具体要求。

本《技术规范》在二氧化碳解吸及吸收剂再生系统中，推荐解吸塔的塔底温度和塔顶温度宜分别控制在 90℃ 和 85℃，略低于 GB/T51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》中推荐的解吸塔塔底温度宜控制在 100℃-125℃，这是考虑到机胺溶液在 130℃ 以上容易失活以及富液在温度较低时解吸二氧化碳效率降幅较小而设定的，同时能够延长吸收剂长时间在吸收塔和解吸塔之间，循环过程中的使用寿命。

本《技术规范》在二氧化碳压缩后的净化系统中，明确了当二氧化碳产品纯度要求较高时，宜采用吸附法和精馏法进行纯化，而 GB/T51316《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》仅推荐使用固体吸附法。同时本《技术规范》明确了食品级二氧化碳中的硫含量与含水量，而其他标准无此方面具体要求。

本《技术规范》是对二氧化碳捕集系统的规定，重点关注捕集系统工艺流程中的关键指标以及对设备结构和参数的规范，而 ISO 27919-1:2018《Carbon dioxide capture - Part 1: Performance evaluation methods for post-combustion CO₂ capture integrated with a power plant》适用于基于使用反应性溶液（如胺水溶液、碳酸钾溶液和氨水）进行化学吸收的燃烧后二氧化碳捕集技术。该标准包括二氧化碳捕集装置、压缩或液化、二氧化碳运输和储存等相关步骤。针对二氧化碳捕集系统做了详细的评价，涵盖了性能的主要指标评价和计算方法、化学溶液和热耗电耗测量方法的一般性规定，以及具体实施方法等方面的规定。

本《技术规范》是专门针对水泥窑烟气，采用化学吸收法的二氧化碳进行捕集工艺和技术指标制定的标准。而 ISO/TR 27912:2016《Carbon dioxide capture - Carbon dioxide capture systems, technologies and processes》对多种二氧化碳的捕集方法进行了规定，包括燃烧前捕集、富氧燃烧捕集、燃烧后捕集。也对多应用场景的二氧化碳捕集技术进行了描

述，包括水泥工业、钢铁工业、化工行业。并对未来可能的二氧化碳捕集方向进行了讨论。针对燃煤烟气二氧化碳捕集系统的技术、设备、工艺、管理、评价等方面制定了标准。

本《技术规范》与 ISO/TR 27922:2021 《Carbon dioxide capture - Overview of carbon dioxide capture technologies in the cement industry》存在较大区别，ISO/TR 27922:2021 主要是技术综述，综述了现有的二氧化碳捕集技术的原理以及进展情况，包括有机胺吸附、变压吸附、膜分离、直接物理分离、钙循环、富氧燃烧等。此外分析了评估应用何种二氧化碳捕集技术的影响因素，并通过案例分析对各种碳捕集技术经济性进行了评估，得出碳捕集关键绩效指标。该标准没有对碳捕集技术的工艺路线、选择原则、技术参数等进行规范，只是对多种碳捕集技术作出详细的介绍，并讨论了相关技术选用的评价方法。

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/T51316

《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》（GB/T51316，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需在 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》在《设计标准》的基础上，针对于水泥窑烟气的复杂性，沿用了《设计标准》中对工艺系统的相关规定，并对二氧化碳捕集提出了更高水平的技术指标。本《技术规范》与《设计标准》协调配套，没有冲突。

8.2 《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》JB/T12909

《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》JB/T12909，已于 2016 年 10 月发布，2017 年 4 月开始实施。该标准规定了燃煤烟气有机胺吸收法二氧化碳捕集装备的术语和定义、要求、调试、启动及验收、运行与维护、安全防护要求、标牌、标志、包装、运输和贮存。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。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。本《技术规范》与《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》JB/T12909 的侧重点有一定区别，本《技术规范》对捕集工艺设备参数的具体要求，与《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》规定的没有冲突。

8.3 《燃煤烟气二氧化碳捕集装备运行规范》JB/T12536

《燃煤烟气二氧化碳捕集装备运行规范》JB/T12536 已于 2015 年 10 月发布，2016 年 3 月开始实施，该标准规定了燃煤烟气化学吸收法二氧化碳捕集装置运行规范的术语和定义、总则、碳捕集装置的启动、运行调整、装置停运、主要故障处理、安全运行、运行和维护管理等内容，适用于燃煤烟气二氧化碳捕集量为每年 100 万吨或以下，采用化学吸收法的二氧化碳捕集装置的运行、维护和安全运行。该标准的重点内容是二氧化碳捕集设备的运行管理维护等，所规定的设备运行技术参数与本《技术规范》没有冲突，协调配套运行。

九、重大分歧意见的处理经过和依据

无

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

无其它应予说明的问题。