

T/CIEP

中国工业环保促进会团体标准

T/XXX XXXX—XXXX

二氧化碳捕集与再利用系统技术规范

Technical specification for carbon dioxide capture and reuse system

（征求意见稿）

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX – XX – XX 发布

XXXX – XX – XX 实施

中国工业环保促进会 发布

目 次

前言 II

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 基本要求 2

5 捕集系统 2

6 运输 3

7 再利用 4

8 封存 5

前 言

本文件按照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。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国工业环保促进会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

二氧化碳捕集与再利用系统技术规范

1 范围

本文件规定了二氧化碳捕集与再利用的基本要求、捕集系统、输送、再利用和封存。
本文件适用于二氧化碳捕集与再利用系统技术。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB 18564.1 道路运输液体危险货物罐式车辆
GB/T 34236 二氧化碳制甲醇技术导则
GB/T 34250 二氧化碳制甲醇安全技术规程
GB/T 42797 二氧化碳捕集、输送和地质封存 管道输送系统
GB/T 51316—2018 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
SY/T 7785 二氧化碳地质封存工程环境风险控制要求
SY/T 6565 石油天然气开发注二氧化碳安全规范
TSG R0005 移动式压力容器安全技术监察规程

3 术语和定义

GB/T 51316—2018界定的以及下列术语和定义适用于本文件。

3.1

二氧化碳捕集 carbon capture

将二氧化碳从大气、工业或能源相关的排放源中捕集出来的过程。

3.2

二氧化碳 carbon dioxide; CO₂

分子式为CO₂，化学性质非常稳定，在大气中的滞留时间(寿命)可达几十年或上百年，是影响地球辐射平衡的主要温室气体。

注：人为来源主要是化石燃料和生物质的燃烧、土地利用变化以及工业过程排放，主要碳汇为陆地和海洋吸收。

3.3

燃烧后脱碳 decarbonize after combustion

在燃烧过程完成后，从烟道气中捕集CO₂的过程。

3.4

燃烧前脱碳 decarburize before combustion

在碳基燃料燃烧前，将其化学能从碳转移到其他物质中，再将其捕集的过程。

3.5

富氧燃烧 Oxygen Enriched Combustion

一种以高于空气氧气含量（20.947%）的含氧气体进行燃烧的高效节能燃烧技术。

3.6

烟气 flue gas/exhaust gas

燃料燃烧产生的气体，通常经过脱硫脱硝除尘后排放到大气中。

3.7

化学吸收法 chemical absorption method

化学吸收剂在吸收塔内与烟气中的 CO_2 进行化学反应生成化合物，并在再生塔内经升温后释放出吸收的 CO_2 ，完成 CO_2 与其他气体分离的方法。

4 基本要求

应遵循因地制宜、安全可靠、技术合理、经济适用的基本原则。

5 捕集系统

5.1 燃烧前脱碳

燃烧前脱碳捕集流程分为以下三步实施：

- 合成气的制取。将煤炭、石油焦、天然气等燃料与水蒸气、氧气进行不完全的燃烧反应，生成 CO 和 H_2 为主的合成气；
- 合成气变换。将合成气的 CO 与水蒸气发生 CO 变换反应，生成 CO_2 和 H_2 ；
- H_2/CO_2 分离。将不含能量的 CO_2 同能量载体 H_2 分离。

5.2 富氧燃烧

5.2.1 富氧燃烧流程应包含但不限于以下内容：

- 氧气制备。通过空气分离设备（如深冷分离或变压吸附）制取高纯度氧气；
- 燃料准备。根据应用场景选择燃料；
- 氧气与 CO_2 混合。根据燃烧器的设计要求，氧气与 CO_2 按特定比例混合；
- 点火与燃烧。使用点火装置（如电火花或火焰点火器）点燃混合气体；
- 热量利用。高温烟气通过热交换器、锅炉或其他设备传递热量，用于发电、加热或工艺需求；
- 烟气处理。烟气经过脱硫、脱硝和除尘等处理，减少硫氧化物（ SO_x ）、氮氧化物（ NO_x ）和颗粒物排放。

5.2.2 监控与优化。通过传感器和控制系统监测氧气浓度、燃料流量、温度和压力等参数。根据燃烧效率和排放数据，动态调整氧气与燃料的比例，确保系统高效运行。

5.2.3 应采用专门的纯氧燃烧技术，采用专门材料的纯氧燃烧设备以及空分系统。

5.3 燃烧后脱碳

5.3.1 燃烧过程完成后，注入化学吸收剂或利用吸附材料捕捉烟气中的 CO_2 ，通过化学反应或物理吸附过程将 CO_2 分离捕集，适用于大多数火力发电厂。

5.3.2 燃烧后脱碳流程应包含但不限于以下内容：

- 烟气预处理。去除烟气中对 CO_2 吸收过程有害的杂质（如颗粒物、硫氧化物、氮氧化物等），并调整烟气的温度和流量，以适应吸收剂的要求；
- CO_2 吸收。烟气中的 CO_2 被吸收剂（一般为胺类溶液）捕获，形成富液，从而实现 CO_2 的分离；
- CO_2 解吸。通过加热富液（富含 CO_2 的吸收剂）使 CO_2 从吸收剂中分离出来，同时恢复吸收剂的活性，以便循环使用。
- CO_2 压缩与脱水。将解吸出的 CO_2 气体进行处理，使其达到适合运输和封存的条件。

5.4 化学链燃烧

与空气不直接接触的情况下，燃料与金属氧化物反应， CO_2 产生在专门的反应器中。金属氧化物与燃料进行隔绝空气的反应，产生热能、金属单质以及 CO_2 和水，金属单质再输送到空气反应器中与氧气进行反应，再生为金属氧化物。反应生成的 CO_2 和水处于反应器中。

5.5 化学吸收法

5.5.1 将含有 CO_2 的烟气通过吸收塔，与碱性吸收剂（如胺类）接触，形成化合物将 CO_2 吸收。通过加热或降压，将 CO_2 从吸收剂中分离出来。

5.5.2 化学吸收法吸收溶剂以有机胺、离子液体、氨及氨基酸盐类为主，应根据不同的适用场景和捕集率选择吸收能力强，再生能力强，对环境友好型的吸收溶剂。

5.5.3 燃煤烟气二氧化碳捕集装备应符合 JB/T 12909 的要求。

5.6 冷却塔化学吸收法

5.6.1 基于工业冷却塔的气液交换特性，通过优化气液接触效率，实现空气中 CO₂ 的直接捕集。适用于化工生产行业，特别是对大型工业冷却塔有直接需求的场景。

5.6.2 冷却塔化学吸收流程应包含但不限于以下内容：

——含 CO₂ 的烟气从冷却塔底部进入，与顶部喷淋的吸收剂（如胺液）逆流接触，CO₂ 被化学吸收；

——吸收 CO₂ 后的富液进入再生塔，加热至 100℃～120℃，使 CO₂ 释放，吸收剂再生。

5.6.3 结合工业冷却塔运行条件，将吸收剂溶解于工业冷却塔循环水中，并将吸收液 pH 值控制在 9～10 之间。

5.6.4 采用碱性缓冲型吸收液，可在初始 pH 值范围为 9～10 的条件下实现空气中 CO₂ 的高效捕集。捕集液对不锈钢材质无腐蚀性，适用于工业冷却塔及相关设备的长期稳定运行。

5.6.5 采用缓冲型捕集液，其二氧化碳负载量不低于 0.13 mol/L，饱和 pH 值不高于 9.50。可在 15℃～35℃ 下进行空气碳捕集，适配多数工业冷却塔循环水温度变化区间。

5.6.6 利用电化学法调控二氧化碳负载捕集液的 pH 值，实现 CO₂ 的高效释放，同时避免副产物气体的生成。适用于工业冷却塔运行场景，具有操作简便、释放效率高及产物纯净的特点。

5.6.7 采用电解设备为三腔室结构，可实现 CO₂ 与副产物气体的分离输出，提高气体产物的纯净度。

5.6.8 向捕集液中添加不影响捕集性能的强电解质，提高溶液电导率，从而降低电解能耗，在 125 mA/cm² 电流密度下电解槽压不应高于 6.0 V。

5.6.9 强化捕集/释放系统稳定性。本方法经过 5 次以上多周期循环测试，捕集液性能保持稳定，未出现捕集性能下降情况。

5.7 物理吸收法

利用高压或低温条件，将含有 CO₂ 的烟气与溶剂（如甲醇、水等）接触，使 CO₂ 溶解于溶剂中。通过降压或加热，将 CO₂ 从溶剂中分离出来。

5.8 吸附法

采用多孔材料（如活性炭、分子筛等）对 CO₂ 进行吸附分离。通过调节温度和压力，实现 CO₂ 的脱附和回收。

5.9 膜分离法

利用选择性透膜，将 CO₂ 从烟气中分离出来。通过调节膜材料和操作条件，实现对二氧化碳的高效分离。

5.10 冷冻法

利用 CO₂ 在低温下凝结的特性，通过降温使其从烟气中分离出来。

5.11 生物固定法

利用微生物或酶类来固定二氧化碳的方法。通过将适当的微生物或酶类固定在载体上，使其具有较强的 CO₂ 吸收能力。适用于一些特定的工业生产过程中，如酿酒、酿醋等过程中的 CO₂ 收集。

5.12 离子液体吸收法

利用离子液体对 CO₂ 的高选择性吸收能力，将 CO₂ 吸收并转化为其他物质的方法。离子液体具有较高的吸附性能和稳定性，适用于对 CO₂ 纯度要求较高的场合。

6 运输

6.1 将捕集的 CO₂ 通过管道、压缩运输等方式，运送到可利用或可封存场地的过程。

6.2 管线运输

工业生产中，将 CO₂ 压缩成液态、气态或超临界状态，通过专门的管道运输到目的地。管道要求、介质性质应符合 GB/T 42797 的相关要求。

6.3 槽罐车运输

将 CO₂ 冷却压缩，压缩后的 CO₂ 会变成液态，储存于罐中，再通过罐的压力调节，将储存在压力罐中的 CO₂ 释放出来。槽罐车应符合 GB 18564.1 和 TSG R0005 要求，

6.4 固态运输

CO₂ 通过加压和冷却的流程转变为干冰，使用高强度泡沫箱或真空绝热箱为主的容器，按照相关要求运输。

7 再利用

7.1 化工合成

7.1.1 合成尿素。利用氨和 CO₂ 为原料，在高压、高温下进行合成尿素。

7.1.2 合成碳酸二甲酯。利用 CO₂ 与甲醇催化合成碳酸二甲酯。

7.1.3 合成甲醇。利用铜基催化剂进行 CO₂ + H₂ 直接合成甲醇。合成甲醇应符合 GB/T 34236、GB/T 34250 的要求。

7.1.4 合成二甲醚。利用 CO₂ 加氢制二甲醚。

7.1.5 以 CO₂ 为原料可生产一系列其他有机化工产品，主要有双氰胺、碳酸丙烯酯、碳酸乙撑酯、水杨酸、对甲基水杨酸、对羟基苯甲酸、2-羟基-3-萘甲酸等，还可利用 CO₂ 来合成甲烷，乙醇、草酸、二甲胺、二甲基甲酰胺、乙酸、甲酸和丙酸等。

7.1.6 以 CO₂ 为原料生产成碳酸钠、碳酸氢铵、纳米碳酸钙等无机化工产品。

7.2 农业应用

7.2.1 二氧化碳施肥。将 CO₂ 注入温室中，促进植物光合作用，提高作物产量。

7.2.2 可作为人工降雨剂。

7.3 食品应用

7.3.1 可用于蔬菜、瓜果的保鲜贮藏和粮食的贮藏。库里充入二氧化碳，可防止粮食虫蛀和蔬菜腐烂，延长保存期。

7.3.2 可用来酿酒，CO₂ 创造一个缺氧的环境，有助于防止细菌在葡萄生长。

7.3.3 可用于食品的保鲜和冷冻过程。CO₂ 具有较低的温度和较强的冷却能力，可以防止食品腐败和细菌滋生。

7.3.4 碳酸饮料。CO₂ 可用饮料充气。

7.3.5 冷冻保鲜。干冰用于冷链运输。

7.4 工业应用

7.4.1 作为致冷剂。不仅冷却速度快，操作性能好，不浸湿产品，不会造成一次污染。

7.4.2 可用于消防领域，隔绝氧气并稀释可燃气体浓度，迅速抑制火焰的燃烧。

7.4.3 可控制 pH 值，游泳池加入 CO₂ 以控制 pH 值，加入 CO₂ 从而保持 pH 值不上升。

7.4.4 可用于制碱工业和制糖工业。

7.4.5 可用于塑料行业的发泡剂。

7.4.6 干冰可以用于清理核工业设备及印刷工业的版辊等。

7.4.7 富氧燃烧的碳捕集应用。

7.5 地质利用

7.5.1 强化石油开采。将 CO_2 注入油藏，利用其与石油的物理化学作用，实现增产石油并封存 CO_2 。广泛应用于页岩油气的开采中。陆上油气田注 CO_2 应符合 SY/T 6565 的要求。

7.5.2 驱替煤层气。将 CO_2 或者含 CO_2 的混合气体注入到深部不可开采煤层中，实现 CO_2 长期封存同时强化煤层气开采。

7.5.3 强化天然气开采。将 CO_2 注入到即将枯竭的天然气气藏底部，将残存天然气驱替出来。

7.5.4 增强页岩气开采。利用 CO_2 代替水来压裂页岩，置换 CH_4 ，从而提高页岩气开采率，实现 CO_2 封存。

7.5.5 增强地热开采。将 CO_2 注入深层热储，通过生产井回采，以 CO_2 为工作介质的地热开采利用。

7.5.6 铀矿浸出增采。将 CO_2 与溶浸液注入砂岩型铀矿层，通过抽注平衡维持溶浸流体在铀矿床中运移，并与含铀矿物质选择性溶解，采出铀矿同时实现 CO_2 封存。

7.5.7 强化深部咸水层开采。将 CO_2 注入深部咸水层或卤水层，驱替高附加值液体矿产资源（如钾盐、锂盐、溴素等）或深部水资源的开采，实现 CO_2 长期封存。

7.6 建筑行业应用

CO_2 矿化养护混凝土。通过 CO_2 与水泥中的钙离子和镁离子反应生成碳酸钙和碳酸镁颗粒，缩短混凝土的初凝时间、提高抗压强度，减少水泥用量。

7.7 高附加值碳基新材料应用

电解 CO_2 制备碳纳米管和石墨烯，应用于锂电池导电浆料、导电塑料、太阳能导电银浆、防腐涂料和导热硅脂等方面。

8 封存

8.1 地质封存

8.1.1 总体要求

将 CO_2 加压灌注到合适的地层中，通过一系列的物理和化学俘获机制实现永久封存， CO_2 储存层可以是咸水层、枯竭油气藏或不可开采煤层。地质封存应符合 GB/T 42797 的要求，工程环境风险控制应符合 SY/T 7785 的要求。

8.1.2 咸水层地质封存

将超临界态 CO_2 注入地下深度 $\geq 800\text{m}$ 深的高孔隙度、高渗透性的咸水层中，利用岩层孔隙空间储存 CO_2 ，并通过盖层封闭、 CO_2 溶于地层水及矿化反应实现稳定封存。

8.1.3 枯竭油气藏地质封存

将 CO_2 注入已枯竭或近枯竭的油气储层中，利用原有地质构造的封闭性封存 CO_2 ，封存机制以构造圈闭和残余气捕获为主。

8.1.4 不可开采煤层地质封存

向因技术或经济因素无法开采的深层煤层中注入 CO_2 ，利用煤基质对 CO_2 的高吸附性（优先吸附 CO_2 并置换甲烷）实现封存。

8.2 海洋封存

8.2.1 总体要求

通过管道或船舶将 CO_2 运输到海洋封存的地点，将 CO_2 注入海洋的水柱体或海床，根据封存机理的不同可以分为海洋水柱封存、海洋沉积物封存、 CO_2 置换天然气水合物封存及海洋地质封存。

8.2.2 海洋水柱封存

将 CO_2 通过船舶或管道输送至海洋中层（通常为 500m~3000m 深度），通过一系列物理和化学反应实现 CO_2 溶解和吸收，最终实现长期稳定封存。

8.2.3 海洋沉积物封存

将 CO_2 注入到海底的多孔床层中，在沉积物层的高压（ >30 个大气压）和低温（ $2^\circ\text{C}\sim 10^\circ\text{C}$ ）条件下，使 CO_2 形成晶体状的水合物（ CO_2 水合物）并稳定覆盖在海床上，从而实现 CO_2 在海底沉积物层内的有效封存。

8.2.4 CO_2 置换天然气水合物封存

通过与可燃冰开采相结合，向天然气水合物（主要成分为 CH_4 水合物）矿床和下伏堆积层注入 CO_2 ，实现 CO_2 水合物置换和堆积层 CO_2 水合物的生成，最终达成 CO_2 的长周期有效封存。

8.2.5 海洋地质封存

8.3 矿化封存

8.3.1 原位矿化封存

直接将 CO_2 注入到富含硅酸盐的地层中，在地层原位完成 CO_2 与含有碱土金属氧化物的天然矿石（如玄武岩、橄榄岩等）反应，生成永久的、更为稳定的碳酸盐，从而实现 CO_2 永久性大规模封存。

8.3.2 非原位矿化封存

将 CO_2 与富含钙（Ca）、镁（Mg）等碱金属的天然矿物或钢渣、粉煤灰等工业固废反应，生产稳定的碳酸盐矿物，进而实现 CO_2 的长周期封存。
