

ICS 91.100.10

CCS Q11

CBMF

中国建筑材料协会标准

T/CBMF XX-XXXX

水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术 规范 变压吸附

Technical specifications for carbon dioxide capture and purification of cement kiln

exhaust gases:— Pressure swing adsorption

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

中国建筑材料联合会 发布

目 次

前 言 II

1 范围 3

2 规范性引用文件 3

3 术语和定义 3

4 基本要求 5

5 工艺与装备 6

6 安全与职业卫生 8

7 性能测试 9

8 运行维护与管理 9

附 录 A （资料性） 水泥窑烟气二氧化碳变压吸附捕集纯化系统能耗计算方法 10

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。

本文件由中国建筑材料联合会提出并归口。

本文件起草单位：

本文件主要起草人：

本文件主要审查人：。

水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化技术规范：变压吸附

1 范围

本文件规定了水泥窑烟气变压吸附二氧化碳捕集技术的基本要求、工艺与装备、安全与职业卫生、性能测试、运行维护与管理的内容。

本文件适用于采用变压吸附法的水泥窑烟气二氧化碳捕集纯化系统（简称“碳捕集纯化系统”）的项目设计和运行管理。

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/T 150 压力容器
- GB/T 536 液态无水氨
- GB 1886.228 食品安全国家标准 食品添加剂 二氧化碳
- GB/T 2589 综合能耗计算通则
- GB 2894 安全标志及使用导则
- GB 4396 二氧化碳灭火剂
- GB 4915 水泥工业大气污染物排放标准
- GB/T 6052 工业液体二氧化碳
- GB/T 6920 水质 pH值的测定 玻璃电极法
- GB 15603 危险化学品储存通则
- GB 18613 电动机能效限定值及能效等级
- GB 19761 通风机能效限定值及能效等级
- GB/T 19773 变压吸附分离系统性能测试规范
- GB/T 22133 流体流量测量 科里奥利流量计
- GB/T 23938 高纯二氧化碳
- GB/T 24925 低温阀门技术条件
- GB/T 26282 气体流量测量 标准孔板流量计
- GB/T 27977 水泥生产电能能效测试及计算方法
- GB 30254 高压三相笼型异步电动机能效限定值及能效等级
- GB 30485 水泥窑协同处置固体废物污染控制标准
- GB/T 33652 工业企业温室气体排放数据质量管理技术规范
- 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
- GB/T 40789 气体分析 一氧化碳含量、二氧化碳含量和氧气含量在线自动测量系统 性能特征的确
定
- GB/T 45121 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 46877 二氧化碳捕集 燃烧后二氧化碳捕集系统通用要求
- GB/T 50087 工业企业噪声控制设计规范
- GB 50264 工业设备及管道绝热工程设计规范
- GB 50295 水泥工厂设计规范
- GB 50493 石油化工可燃气体和有毒气体检测报警设计标准
- GB 50577 水泥工厂职业安全卫生设计规范
- GB/T 51316 烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准
- GBZ 1 工业企业设计卫生标准
- AQ 3013 危险化学品从业单位安全标准化通用规范

HG/T 20509 仪表供电设计规范
HG/T 20513 仪表系统接地设计规范
JB/T 6443 离心式压缩机
JB/T 7675 活塞式真空泵
JB/T 9105 活塞式压缩机
JB/T 11237 真空技术 罗茨型干式真空泵
JC/T 879 水泥工业用离心通风机技术条件
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 3172 玻璃窑炉烟气二氧化碳捕集纯化技术规范
NB/T 47041 塔式容器
NB/T 47042 卧式容器
NB/T 11026 板壳式换热器
SH/T 3092 石油化工分散控制系统设计规范
SH/T 3530 石油化工立式圆筒形钢制焊接储罐设计规范
TSG 08 特种设备使用管理规则
TSG 21 固定式压力容器安全技术监察规程
TSG 31 工业管道安全技术规程

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

变压吸附法 pressure swing adsorption; PSA

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。

[来源：GB/T 19773-2005，3.1]

3.2

真空变压吸附 vacuum pressure swing adsorption; VPSA

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。

[来源：JC/T 3172-2026，3.2]

3.3

吸附剂 adsorbents

用于实现CO₂与其他气体分离的固体材料。

注：从含CO₂气流中吸附CO₂，或从CO₂气流中吸附其他杂质。

[来源：GB/T 46877-2025，3.6]

3.4

3.5

3.6

吸附塔 adsorber

内装吸附剂，承受交变荷载，从含 CO₂ 气体中分离提纯 CO₂ 的塔器。

[来源：GB/T 46877-2025，3.11]。

3.7

预处理塔 pretreater

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。

[来源：GB/T 45121-2024，3.8]。

4 基本要求

4.1 系统构成

碳捕集纯化系统构成如图 1 所示。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。

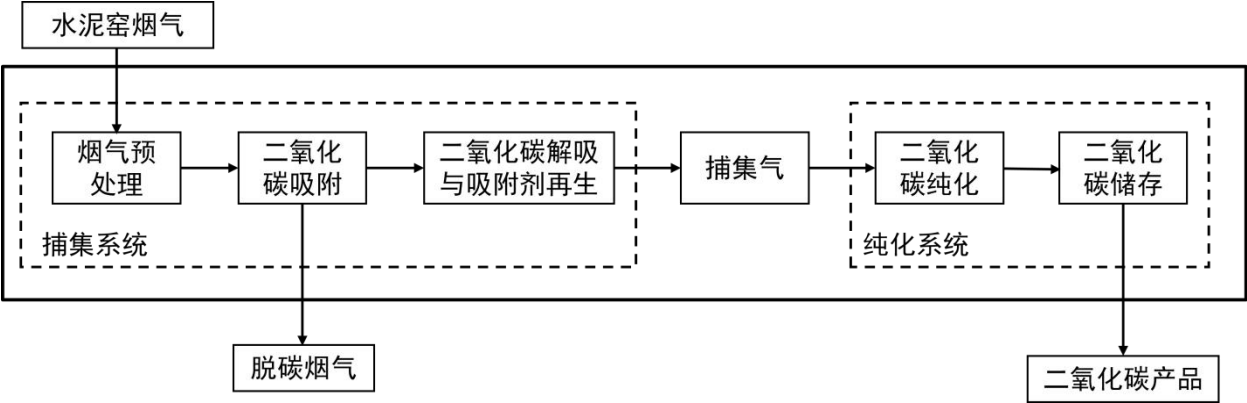


图 1 碳捕集纯化系统构成示意图

4.2 技术指标

4.2.1 水泥窑碳捕集纯化系统的设计、设备选型及安装，应符合 GB/T 51316、GB/T 46877 和 GB 50295 的规定。

4.2.2 系统主要性能指标见表 1。

表 1 系统主要性能指标

序号	指标名称		参数值
1	能耗	烟气预处理过程能耗	≤0.06 GJ/t CO ₂
		变压吸附过程能耗	≤0.40 GJ/t CO ₂
		二氧化碳提纯过程能耗	≤0.70 GJ/t CO ₂
2	吸附过程捕集率		≥90%
3	提纯过程回收率		≥90%
4	产品要求		工业用二氧化碳符合 GB/T 6052 的指标
			食品级二氧化碳符合 GB 1886.288 的指标
			灭火用二氧化碳符合 GB 4396 的指标

4.2.3 系统入口烟气干基二氧化碳体积分数宜不小于 70%，二氧化碳气体浓度检测应符合 GB/T 40789 的相关规定。

错误！未定义样式。

- 4.2.4 系统外排烟气应满足 GB 4915 及地方水泥行业污染物排放标准相关限值。
- 4.2.5 采用协同处置或替代燃料的水泥窑，其碳捕集纯化系统外排烟气应满足 GB 30485 污染物排放标准相关限值。

5 工艺与装备

5.1 一般规定

- 5.1.1 碳捕集纯化系统的工艺流程应根据原料烟气组成及性质、产品要求、场地条件等具体情况，经技术可行性与经济合理性综合比较后确定。
- 5.1.2 系统所选用的节能风机能效指标应不低于 GB 19761 规定的 2 级能效指标。
- 5.1.3 高压笼型电动机能效等级应不低于 GB 30254 规定的 2 级能效指标，低压通用电动机能效等级应不低于 GB 18613 规定的 2 级能效指标。
- 5.1.4 机泵备用配置应根据装置连续运行要求确定，重要机泵宜采用在线备用方式。
- 5.1.5 当设备及管道运行温度显著低于环境温度时，应采取可靠保冷措施，保温、保冷层的设计应符合 GB 50264 的规定。
- 5.1.6 系统的操作弹性应取设计能力的 50%~120%。

5.2 烟气预处理

- 5.2.1 预处理单元主要构成包括引风机、降温塔、预处理塔、泵等设备。
- 5.2.2 预处理单元入口烟气中的粉尘、SO₂ 和 NO_x 等污染物宜符合 GB 4915 的要求。
- 5.2.3 降温塔、预处理塔、液泵及连接管道的材料应选用奥氏体不锈钢（统一数字代号为 S31603），过流部位衬氟塑料或采用符合 GB/T 50726 相关规定的碳钢衬里材料。
- 5.2.4 预处理塔宜采用氢氧化钠、碳酸钠或碳酸氢钠碱液作为脱硫液，脱硫液循环出口管道设置酸碱度（pH）计，pH 值控制为 6.5~8.5 范围内，预处理塔上段宜配套水洗段，去除烟气中夹带的洗涤液雾滴。
- 5.2.5 烟气预处理装置的出口烟气要求如表 2 所示：

表 2 烟气预处理的出口烟气要求

指标	参数值
温度	不宜高于 45℃
粉尘	≤5 mg/m ³
SO ₂	≤20 mg/m ³
NO _x	≤50 mg/m ³
Cl	≤10 mg/m ³
H ₂ S	≤5 mg/m ³
HF	≤5 mg/m ³
重金属	≤2 mg/m ³

- 5.2.6 烟气预处理装置入口宜设置引风机增压输送，设备应满足 JC/T 879 的规定。
- 5.2.7 烟气预处理过程宜采用逆流水洗方式进行直接接触降温，洗涤水温不宜高于 60℃。
- 5.2.8 干燥工艺宜将烟气露点控制在低于工况压力下气体饱和理论露点 10℃以内。
- 5.2.9 预处理塔的设计应符合 NB/T 47041 的要求。

5.3 二氧化碳吸附

- 5.3.1 变压吸附主要构成包括烟气压缩机、吸附塔组、真空泵（可选）、冷却器、分离罐、缓冲罐等。
- 5.3.2 吸附塔组的吸附压力在 0.2MPa(G)~0.4MPa(G)范围时，宜采用带真空泵的真空变压吸附；当吸附压力高于 1MPa，可采用不带真空泵的变压吸附。
- 5.3.3 吸附塔组的空塔气速宜在 0.1 m/s-0.35 m/s 范围内。
- 5.3.4 吸附塔组应采用多塔循环工艺，采用 VPSA 吸附塔组的应满足“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、终升”的多塔同步循环流程。

错误！未定义样式。

- 5.3.5 吸附塔组的均压次数不宜少于 3 次，吸附塔的数量不少于 5 个。
- 5.3.6 吸附相杂质如 N₂、O₂、Ar 等体积分数应≤10%。
- 5.3.7 吸附塔应按 GB/T 150 的相关规定设计校核。
- 5.3.8 吸附剂的性能参数应符合 JC/T 3172 的相关规定，且在工艺设计的温度、压力及原料气组分条件下，吸附剂对 CO₂ 与 N₂ 的分离系数宜≥5。
- 5.3.9 吸附工艺涉及的自动阀门应选用具备压力、时间双重耦合控制方式的程序控制阀，并符合 GB/T 19773 及以下要求：
- 1) 能承受频繁动作，设计寿命应达到 10⁶ 以上；
 - 2) 程序控制阀的阀芯和阀座的密封性能应达到 ANSI VI 级的要求。
- 5.3.10 真空泵组宜选用符合 JB/T 11237 规定的罗茨型干泵或符合 JB/T 7675 规定的活塞式真空泵，且应采用无油、无水结构形式。
- 5.3.11 气液分离器、冷却器和缓冲罐应符合 GB/T 51316 要求。

5.4 二氧化碳纯化

- 5.4.1 二氧化碳纯化主要构成包括压缩、干燥、吸附、脱硫、冷却、液化、精馏及辅助设备。
- 5.4.2 二氧化碳在进入压缩机前，宜将二氧化碳气体降温至 0-10℃。
- 5.4.3 提纯单元设备符合 GB/T 51316 及以下要求：
- a) 离心式压缩机设备应符合 JB/T 6443 的相关规定；
 - b) 活塞式压缩机设备应符合 JB/T 9105 的相关规定；
 - c) 冷却器、液化器宜选用符合 NB/T 11026 相关规定的板壳式换热器设备。
- 5.4.4 液化过程的阀门选型与结构应符合下列要求：
- a) 宜选用符合 GB/T 24925 规定的低温闸阀或低温球阀；
 - b) 低温闸阀或低温球阀应设置泄压孔。
- 5.4.5 保冷设备可在外壁包覆聚氨酯等保冷材料或采用冷箱结构，冷箱宜选用珠光砂、矿渣棉或抽真空绝热方式，冷箱内设备及管道与箱体之间的夹层应采用珠光砂绝热。
- 5.4.6 提纯系统未被捕获的排放气及冷量宜返回系统利用。
- 5.4.7 液化制冷剂宜选用液氨、工质 CO₂ 或其他 ODP=0 且 GWP 值较低的环保工质。

5.5 二氧化碳储存

- 5.5.1 二氧化碳的储存方式及主要设备选型应符合 JC/T 2964.1 的相关规定。
- 5.5.2 长距离输送液体二氧化碳的管道，宜在密闭段设置泄压阀避免管道升温超压引起的破损。
- 5.5.3 自增压气化器的热源系统可以来自于蒸汽、电、热水或者空气。
- 5.5.4 首次投用时应采用抽真空联合二氧化碳气体吹扫方法提升罐内设定的储存压力，合格后方可充装液态二氧化碳。

5.6 过程监测与控制

- 5.6.1 二氧化碳捕集纯化系统应配有 DCS 自动化监测与控制系统，且应与水泥生产线中央控制室数据通讯与信息集成，应符合 GB/T 18831 的相关规定。
- 5.6.2 二氧化碳捕集系统主要过程控制参数宜符合表 3 要求。

表 3 CO₂ 捕集系统过程参数要求

序号	单元	控制项目	控制位置	控制内容	报警值
1	烟气预处理	水泥窑烟气	降温塔入口	流量、温度、压力、颗粒物、烟气组分（NO _x 、SO ₂ 、CO ₂ 、H ₂ O、N ₂ 、O ₂ ）	/
2		烟气循环洗涤水	循环洗涤水管道	pH	/
3		净化烟气	预处理塔出口	流量、温度、压力、颗粒物、烟气组分（NO _x 、SO ₂ 、CO ₂ 、H ₂ O、N ₂ 、O ₂ ）	温度：50℃

错误！未定义样式。

4	二氧化碳吸附	压缩后烟气	压缩机出口	温度、压力、流量	/
5		吸附塔压力	吸附塔顶出口	压力	压力：0.15MPa
6		吸附塔出口外排烟气	吸附塔顶出口	温度、压力、流量、烟气组分 (NO _x 、SO ₂ 、CO ₂ 、H ₂ O、N ₂ 、O ₂)	/
7		吸附塔出口外排CO ₂ 气	缓冲罐出口	温度、压力、流量、烟气组分 (NO _x 、SO ₂ 、CO ₂ 、H ₂ O、N ₂ 、O ₂)	/
8	二氧化碳纯化	压缩后二氧化碳	压缩机出口	温度、压力、流量	压力：3MPa
9		液化后二氧化碳	精馏塔塔顶	温度、压力	压力：2.4MPa
10		液化后二氧化碳	精馏塔塔底	二氧化碳液体流量	/
11		循环水	循环水总管道	循环水流量	/
12		制冷剂	制冷机组出入口	温度、压力、流量	压力：1.85MPa (氟利昂) 压力：1.6MPa (液氨) 压力：4.1MPa (CO ₂)
		二氧化碳气相出口	储罐气相出口	压力、温度	/
13		二氧化碳产品	储罐入口	温度、压力、流量、二氧化碳纯度	/
14		二氧化碳产品	储罐出口	流量、二氧化碳纯度	/

5.6.3 控制系统的设计，验收等宜符合 SH/T3092 石油化工分散控制系统设计规范。

5.6.4 控制系统的供电设计宜符合 HG/T 20509 的相关规定。

5.6.5 控制系统的接地宜符合 HG/T 20513 的相关规定。

5.6.6 烟气流量、温度、压力及组分检测应符合 GB/T 26282 的相关规定。

5.6.7 烟气中氮氧化物、二氧化硫检测应符合 GB/T 37186 的相关规定。

5.6.8 pH 值应符合 GB/T 6920 的相关规定。

5.6.9 二氧化碳和氧气的检测应符合 GB/T 40789 的相关规定。

5.6.10 粉尘检测应符合 GB/T 16157 的相关规定。

5.6.11 系统宜配套设置化验分析室，用于常态化检测二氧化碳产品质量指标、监测系统化学药剂关键性能指标，并承担装置开工、停工全过程工况分析工作，液体二氧化碳组分应符合 GB/T 23938 的相关规定。

5.6.12 开工、停工的化验分析应设置临时分析取样口，常态化工艺取样口宜集中引至地面指定区域，便于化验分析人员安全、便捷完成取样工作。

6 安全与职业卫生

6.1 安全

6.1.1 二氧化碳捕集系统安全要求应符合 GB/T 46877 的规定。

6.1.2 火灾爆炸危险场所应设置固定的可燃气体和有毒气体探测器，并配置声光报警装置，其设计应符合 GB/T 50493 的规定。

错误！未定义样式。

6.1.3 封闭式厂房以及室外装置区通风不良的地坑或其他封闭区域，应设置固定的氧气和二氧化碳探测器，并配备声光报警装置。密闭厂房应设置有效的通风系统，通风系统的设计应符合 GB/T 51316 的相关规定。

6.1.4 有泄露风险的位置，应按 GB/T 50493、GB/T 51316 的规定设置监测和报警装置，并采取应急处置措施。

6.1.5 采用液氨作为制冷剂时，涉及液氨的储存、分类、堆放等应符合 GB 15603 危险化学品仓库储存通则的规定，氨气事故排放气宜引至事故水池或焚烧炉处理，液氨的储存、分类应符合 GB 15603 的规定。氨气的安全防火措施应符合 GB 50160 的规定。

6.2 职业卫生

6.2.1 碳捕集系统的职业卫生防护措施应符合 GB 50577 的相关规定。

6.2.2 生产经营单位应满足 GBZ 1 规定的基本卫生要求，并配备事故淋洗器、洗眼器、个人防护用品、急救包、急救箱或其它的应急救援设施。

6.2.3 生产经验单位应按照 GB 2894 安全色和安全标志规范执行安全标志的设计、制作与设置。

6.2.4 危险化学品生产、使用、存储企业及有危险化学品存储设施的经验单元应按照 AQ3013 危险化学品从业单位安全标准化通用规范执行管理和设计工作。

6.2.5 维修人员进入受限空间作业时，应配备便携式氧气、有毒有害气体及可燃气体检测报警仪，其设置和使用应符合 GB 46768 的规定。

6.2.6 工作场所噪声防护应符合 GB/T 50087 的相关规定。

7 性能测试

7.1.1 碳捕集纯化系统建成后，应进行性能测试。

7.1.2 系统性能测试内容的主要内容如表 1 所示。

7.1.3 系统性能测试边界、测试条件、测试要求、性能测试内容、数据处理、性能指标计算等宜合附录 A 的规定。

8 运行维护与管理

8.1 运行管理

8.1.1 系统的运行人员宜单独配置，至少应设置 1 名专职的碳捕集技术管理人员。碳捕集系统的运行维护人员应持证上岗。

8.1.2 技术管理人员、检修人员和运行操作人员应系统掌握系统设备及其他附属设施正常运行的具体操作和应急情况的处理措施。

8.2 系统维护

8.2.1 碳捕集纯化系统应制定维护保养计划。

8.2.2 压力设备应依据 TSG 21 的要求进行定期检验和到期后的安全评估。

8.2.3 压力管道应按照 TSG 31 工业管道安全技术规范执行设计、安装、监督检验、使用、定期检验等工作。

8.2.4 压力容器和压力管道投用后，应按照 TSG 08 特种设备使用管理规则执行管理和使用登记规范执行相关使用与管理工作。

8.2.5 维护保养人员应根据维护保养规定定期检查、更换或维修必要的部件，做好维护保养记录。

8.2.6 碳捕集纯化装置停运后均应检查、清理预处理塔、吸附塔和精馏塔等装置，并进行维护。

8.2.7 系统运行、设备维护及生产活动记录应保存至少 3 年。

附 录 A
(资料性)
水泥窑烟气二氧化碳变压吸附捕集纯化系统能耗计算方法

A.1 测试边界

性能测试边界如图 1 所示，为烟气预处理装置入口到二氧化碳储存装置出口。

A.2 测试条件

A.2.1 性能考核测试前，应制定详细的性能测试计划，各专业考核人员已到位，应根据性能测试内容准备相应的记录表格。

A.2.2 性能测试宜在碳捕集纯化系统负荷试车合格后6个月内进行。

A.2.3 测试过程中使用的仪器、设备等，需经过检定或校准合格。

A.3 测试要求

A.3.1 测试应在碳捕集纯化系统满负荷且运行稳定时进行。

A.3.2 吸附塔入口烟气性能指标符合5.2.5要求。

A.3.3 性能测试周期为168h。

A.3.4 性能测试每次不宜少于8h。

A.4 性能测试内容

A.4.1 测试内容、测试频率及测试方法

测试内容及测试频率见表A.1的要求。

表 A.1 测试内容及测试频率

序号	测试项目	测试内容				8h测试次数
		温度	压力	流量	组分	
1	预处理入口烟气	√	√	√	√	1
2	变压吸附外排烟气	√	√	√	√	1
3	压缩机出口二氧化碳	—	√	√	√	1
4	精馏塔底出口二氧化碳	—	—	√	√	1
5	电耗					1

注：符号“√”表示需要测试项目，“—”表示不需要测试项目。

测试方法见表A.2的要求。

表 A.2 测试方法

序号	测试内容	测试方法
1	气体流量	GB/T 26282
2	气体温度	
3	气体压力	
4	气体组分	
5	二氧化碳流量	GB/T 22133
6	二氧化碳组分	GB/T 23938

A.5 数据处理

A. 5.1 数据处理依据

碳捕集纯化系统能效的测试和计算方法应按照 GB/T 33652 的要求进行,电能能效测试应按照 GB/T 27977 的要求进行。

A. 5.2 数据认定

根据每次测试周期内的测试结果进行能效计算,每次测试周期内能效测试结果之间相差不应大于 5%,否则测试结果无效,应重新进行能效测试。

A. 6 性能指标计算

A. 6.1 烟气预处理单元能耗

烟气预处理单元能耗按式 (A.1) 计算。

$$E_{b1} = \frac{E_{e1} + E_{w1}}{m_t} \dots\dots\dots (A.1)$$

式中:

E_{b1} —统计报告期内烟气预处理单元单位二氧化碳能耗,单位为吉焦每吨二氧化碳 (GJ/t CO₂);

E_{e1} —统计报告期内烟气预处理单元每小时用电设备所消耗的电能,单位为吉焦每小时 (GJ/h),采用 GB/T 2589 进行能耗折算;

E_{w1} —统计报告期内烟气预处理单元每小时运行所需要的水耗,单位为吉焦每小时 (GJ/h),采用 GB/T 2589 进行能耗折算;

m_t —统计报告期内系统每小时二氧化碳产品产量,单位为吨二氧化碳每小时 (t CO₂/h)。

A. 6.2 CO₂吸附单元能耗

CO₂吸附单元能耗按式 (A.2) 计算。

$$E_{b2} = \frac{E_{e2} + E_{w2}}{m_t} \dots\dots\dots (A.2)$$

式中:

E_{b2} —统计报告期内吸附单元单位二氧化碳能耗,单位:吉焦每吨二氧化碳 (GJ/t CO₂);

E_{e2} —统计报告期内吸附单元每小时用电设备所消耗的电能,单位为吉焦每小时 (GJ/h),采用 GB/T 2589 进行能耗折算;

E_{w2} —统计报告期内吸附单元每小时运行所需要的水耗,单位为吉焦每小时 (GJ/h),采用 GB/T 2589 进行能耗折算;

m_t —统计报告期内系统每小时二氧化碳产品产量,单位为吨二氧化碳每小时 (t CO₂/h)。

A. 6.3 CO₂纯化单元能耗

CO₂纯化单元能耗按式 (A.3) 计算。

$$E_{b3} = \frac{E_{e3} + E_{w3}}{m_t} \dots\dots\dots (A.3)$$

式中:

E_{b3} —统计报告期内纯化单元单位二氧化碳能耗,单位:吉焦每吨二氧化碳 (GJ/t CO₂);

E_{e3} —统计报告期内纯化单元每小时用电设备所消耗的电能,单位为吉焦每小时 (GJ/h),采用 GB/T

2589 进行能耗折算；

E_{w3} —统计报告期内纯化单元每小时运行所需要的水耗，单位为吉焦每小时（GJ/h），采用 GB/T 2589 进行能耗折算；

m_3 —统计报告期内系统每小时二氧化碳产品产量，单位为吨二氧化碳每小时（t CO₂/h）。
折算系数见表 A.3。

表 A.3 电、水的统一能源折算值

序号	类别	单位	能耗/GJ
1	电力	MW·h	3.6
2	新水	t	7.54

A. 6. 4 吸附过程捕集率

碳捕集与纯化系统二氧化碳捕集率按式（A.4）计算：

$$\eta_{CO2} = \frac{F_1 \times C_1 - F_2 \times C_2}{F_1 \times C_1} \times 100\% \dots\dots\dots (A.4)$$

式中：

- η_{CO2} —捕集与纯化系统二氧化碳捕集率，%；
- F_1 —标准状态下 CO₂ 捕集单元进口烟气体积流量，单位为立方米每小时（m³/h）；
- F_2 —标准状态下 CO₂ 捕集单元出口烟气体积流量，单位为立方米每小时（m³/h）；
- C_1 —CO₂ 捕集单元进口实测烟气中二氧化碳浓度，%；
- C_2 —CO₂ 捕集单元出口实测烟气中二氧化碳浓度，%。

A. 6. 5 纯化过程回收率

碳捕集与纯化系统回收率按式（A.5）计算：

$$\alpha_{CO2} = \frac{G_2 \times C_{c2}}{G_1 \times C_{c1}} \times 100\% \dots\dots\dots (A.5)$$

式中：

- α_{CO2} —纯化单元二氧化碳纯化回收率，%
- G_1 —纯化单元进口流量，kg/h；
- G_2 —精馏塔底出口流量，kg/h；
- C_{c1} —纯化单元进口二氧化碳浓度，%；
- C_{c2} —精馏塔底出口二氧化碳浓度，%。