JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF×××× — ××××

电厂燃烧后吸收法碳捕集系统能效测试技术规范

Specification for Energy Efficiency Testing of Post-combustion Absorption Carbon Capture Systems Integrated with a Power Plant

（征求意见稿）

××××－××－××发布　　××××－××－××实施

国家市场监督管理总局发布

电厂燃烧后吸收法碳捕集系统能效测试技术规范

Specification for Energy Efficiency Testing of Post-combustion Absorption Carbon Capture Systems Integrated with a Power Plant

归 口 单 位： 全国能源资源计量技术委员会能效标识计量分技术委员会

主要起草单位：

参加起草单位：

本规范委托全国能源资源计量技术委员会能效标识计量分技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

参加起草人：

目 录

引言 ..... （III）
1 范围 ..... （1）
2 引用文件 ..... （1）
3 术语和计量单位 ..... （1）
4 概述 ..... （2）
5 计量特性 ..... （3）
5.1 CO_2 纯度 ..... （3）
5.2 CO_2 捕集率 ..... （3）
5.3 单位时间捕集量 ..... （3）
5.4 单位热能消耗 ..... （3）
5.5 单位电能消耗 ..... （3）
6 测试条件 ..... （4）
6.1 环境条件 ..... （4）
6.2 测量设备 ..... （4）
7 测试项目和测试方法 ..... （6）
7.1 测试项目 ..... （6）
7.2 测试边界与测试位置 ..... （6）
7.3 测试前准备 ..... （7）
7.4 测试方法 ..... （8）
7.5 数据处理与修约 ..... （9）
8 测试结果表达 ..... （10）
8.1 原始记录 ..... （10）
8.2 测试报告 ..... （10）
附录 A 测试原始记录内页参考格式（供参考） ..... （11）
附录 B 测试报告内页参考格式（供参考） ..... （14）
附录 C 碳捕集系统在线计量的条件、项目和方法 ..... （15）
附录 D CO_2 纯度测量结果不确定度评定示例 ..... （22）
附录 E CO_2 捕集率测量结果不确定度评定示例 ..... （24）
附录 F 单位时间捕集量测量结果不确定度评定示例 ..... （29）
附录 G 单位热能消耗测量结果不确定度评定示例 ..... （34）
附录 H 单位电能消耗测量结果不确定度评定示例 ..... （39）
附录 I 气体湿基与干基换算及再生气水分确定方法 ..... （43）

附录 J　测试数据交叉核验方法.....（45）

引　　言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列文件。

本规范为首次发布。

电厂燃烧后吸收法碳捕集系统
能效测试技术规范

1 范围

本规范适用于年捕集量千吨级及以上的电厂燃烧后吸收法碳捕集系统能效及相关参数的测试。

电厂燃烧后吸收法碳捕集中试装置的能效测试可参照本规范执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJG 835 速度-面积法流量装置

JJF 1585 固定污染源烟气排放连续监测系统校准规范

JJF 1857 空调器平衡环境型房间量热计法能效测量装置校准规范

JJF 1858 空调器空气焓值法能效测量装置校准规范

GB/T 8170 数值修约规则与极限数值的表示和判定

GB/T 16157 固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物采样方法

GB/T 34060 蒸汽热量计算方法

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 46870.1 二氧化碳捕集 第 1 部分：电厂燃烧后 CO_2 捕集性能评估方法

GB/T 51316 烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准

DL/T 2201 火力发电厂流量测量装置技术规范

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 碳捕集系统 CO_2 capture system

采用化学方法和/或物理方法将烟气中 CO_2 分离，提纯使之达到一定性能要求的系列装置组合。

［来源：GB/T 45121-2024，3.12］

3.2 CO_2 纯度 CO_2 purity

以干基表示的再生气 CO_2 浓度。

3.3 CO_2 捕集率 CO_2 capture rate

碳捕集系统捕集前后烟气中 CO_2 质量的差值与捕集前烟气中 CO_2 质量的百分比值，单位%。

［来源：GB/T 51316-2018，2.0.7，有修改］

3.4 单位时间捕集量 mass flow rate of captured CO_2

碳捕集系统每小时捕集并产出的 CO_2 质量，单位 t/h。

3.5 单位热能消耗 specific thermal energy consumption

捕集每吨 CO_2 所消耗的热量，单位 GJ/t。

［来源：GB/T 46870.1-2025，3.1.40，有修改］

3.6 单位电能消耗 specific electrical energy consumption

捕集每吨 CO_2 所消耗的电能，单位 kW·h/t。

［来源：GB/T 46870.1-2025，3.1.39，有修改］

4 概述

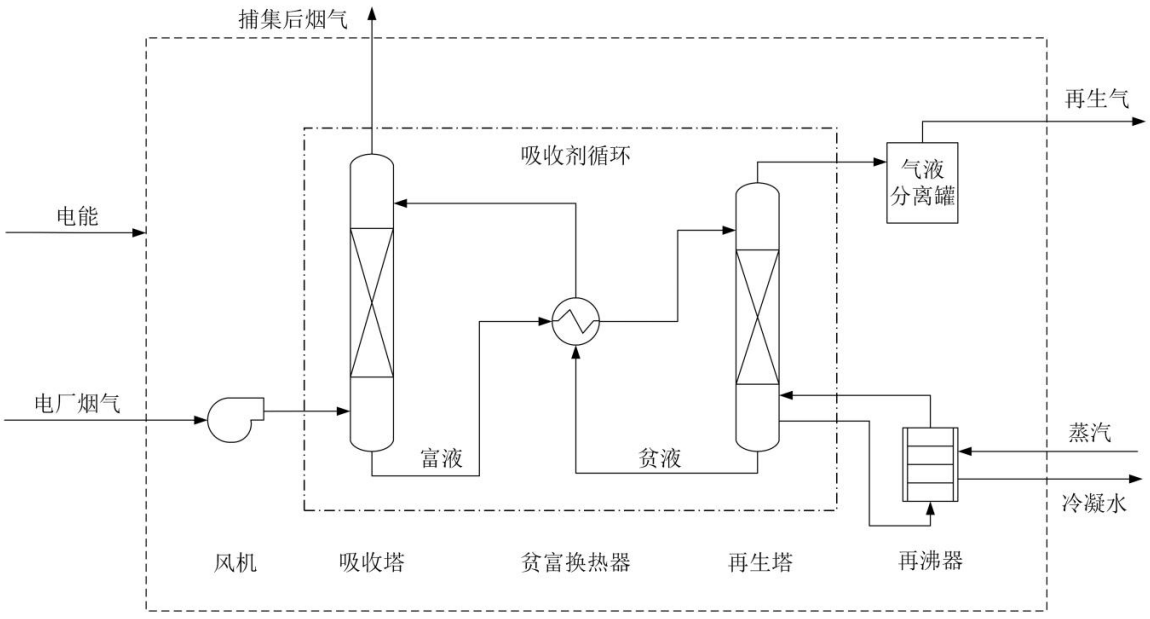


图 1 燃烧后吸收法碳捕集系统示意图

如图 1 所示，燃烧后吸收法碳捕集系统通常设置于电厂除尘、脱硫和脱硝等常规污染物控制设施之后。电厂烟气由风机输送至吸收塔，与贫液接触，烟气中的 CO_2 被吸收剂吸收，形成富液；脱除部分 CO_2 后的烟气从吸收塔顶部以捕集后烟气形式排出。

吸收塔底部排出的富液经贫富换热器换热升温后进入再生塔，在再沸器提供的热量作用下释放 CO_2，实现吸收剂再生。再生塔底部排出的贫液经贫富换热器换热降温后返回吸收塔循环使用；再生塔顶部排出的气体经分离罐进行气液分离后，以再生气形式排出。

碳捕集系统运行过程中需消耗电能和热能。其中，电能主要用于风机、泵、电伴热及能量回收装置等用电设备的运行；热能主要由蒸汽通过再沸器提供，蒸汽换热后形成冷凝水排出系统。系统通常采用分散控制系统（DCS）进行运行监视与控制，并对温度、压力、流量、CO_2 浓度、湿度及电能等测量数据进行采集、显示和存储。

5 计量特性

5.1 CO_2 纯度

CO_2 纯度的测试位置为碳捕集系统气液分离器出口后、压缩机前（如有），测试对象为干基再生气中的 CO_2 摩尔分数，典型测量范围为（90.00~99.99）%，相对扩展不确定度优于 3.0%（k=2）。

5.2 CO_2 捕集率

CO_2 捕集率的测量位置为碳捕集系统吸收塔进口及出口，测试对象为通过吸收塔捕集的 CO_2 量与烟气中所含有的 CO_2 量的百分比值，典型测量范围为（80.00~99.99）%，相对扩展不确定度优于 2.0%（k=2）。

5.3 单位时间捕集量

单位时间捕集量的测量位置为碳捕集系统再生塔气液分离器出口，测试对象为每小时再生气中的干基 CO_2 质量，典型测量范围为（0.1~62.5）t/h，相对扩展不确定度优于 8.0%（k=2）。

5.4 单位热能消耗

单位热能消耗的测量位置为碳捕集系统再生塔气液分离器出口及再沸器，测试对象为单位时间水蒸汽通过再沸器释放的热量与单位时间捕集量的比值，典型测量范围为（1.80~4.00）GJ/t，相对扩展不确定度优于 10.0%（k=2）。

5.5 单位电能消耗

单位电能消耗的测量位置为碳捕集系统风机、泵、伴热、能量回收装置等的电能计量点及再生塔气液分离器出口，测试对象为单位时间内风机、贫液泵、富液泵、其他工艺循环泵、电伴热及能量回收装置等用电设备消耗的总电能与同期 CO_2 捕集量的比值，

典型测量范围为（20.00~40.00）kW·h/t，相对扩展不确定度优于 10.0%（k=2）。

6 测试条件

6.1 环境条件

6.1.1 温度：5℃～50 ℃。

6.1.2 湿度：10% RH～90% RH。

6.1.3 大气压：90 kPa～105kPa。

6.2 测量设备

碳捕集系统性能测试所用测量设备应按照相应计量技术规范进行检定或校准，并具有有效的检定或校准证书，具体见表 1。

表 1 测量设备准确度等级

测量参数	测量设备	典型测量范围	准确度等级 /最大允许误差
温度	热电阻	＜150℃	B 级
	热电偶	＞150℃	1 级
压力	压力变送器	全部	0.5 级
流量	气体容积式流量计	——	烟气和再生气： 2.0 级
	科里奥利流量计	——	再生气和冷凝水： 1.5 级
	孔板流量计	——	烟气和再生气： 2.0 级； 冷凝水和蒸汽： 2.5 级；
	文丘里流量计	——	烟气和再生气： 2.0 级； 冷凝水和蒸汽： 2.5 级；
	涡街流量计	——	烟气和再生气： 2.0 级；

			冷凝水和蒸汽： 2.5 级
	超声波流量计	——	冷凝水： 2.0 级
	电磁流量计	——	冷凝水： 2.5 级
	皮托管流量计	（5~30）m/s	烟气和再生气： ±7.5%
烟气分析	二氧化碳红外气体分析器	烟气： （5～20）%； 捕集后烟气： （0~5）%	二级
CO_2 纯度	二氧化碳红外气体分析器	（90～100）%	二级
水分	湿度计	（5~95）%RH	±2.0%RH
用电量	电能表	——	C 级
	互感器	——	0.5S 级

其中，流量测量装置应根据被测介质特性和测量条件选用，选型可参照 DL/T 2201 的有关规定，其计量性能应满足表 1 的要求。

烟气、再生气、蒸汽和冷凝水可选用孔板或文丘里流量计，并应满足相应节流装置对满管、单相流、流动稳定性、雷诺数及直管段等条件的要求。要求永久压力损失较低时，宜选用文丘里流量计。

烟气和再生气可选用满足流速范围、流场及安装条件要求的皮托管流量计；介质洁净且工况符合仪表适用条件时，也可选用气体容积式流量计，其上游应设置过滤器。

再生气、蒸汽和冷凝水可选用涡街流量计，介质雷诺数不宜小于 20000。

再生气、冷凝水质量流量测量可选用科里奥利流量计。

冷凝水可选用超声波流量计，含固体颗粒或气泡时不宜选用；冷凝水电导率满足所选仪表规定的最低工作电导率要求时，可选用电磁流量计。

对于已安装并接入 DCS、尚未进行检定或校准的测量设备，可采用计量标准器开展在线计量，计量标准器的典型测量范围和准确度等级要求见附录 C。不具备拆装条件的电能表和互感器，可使用安装前的检定或校准证书。

7 测试项目和测试方法

7.1 测试项目

碳捕集系统的能效测试项目见表 2。可根据测试目的，选择相应测试项目。

表 2 碳捕集系统测试项目

序号	项目名称	测试方法章节号
1	CO_2 纯度	7.4.1
2	CO_2 捕集率	7.4.2
3	单位时间捕集量	7.4.3
4	单位热能消耗	7.4.4
5	单位电能消耗	7.4.5

7.2 测试边界与测试位置

7.2.1 测试边界

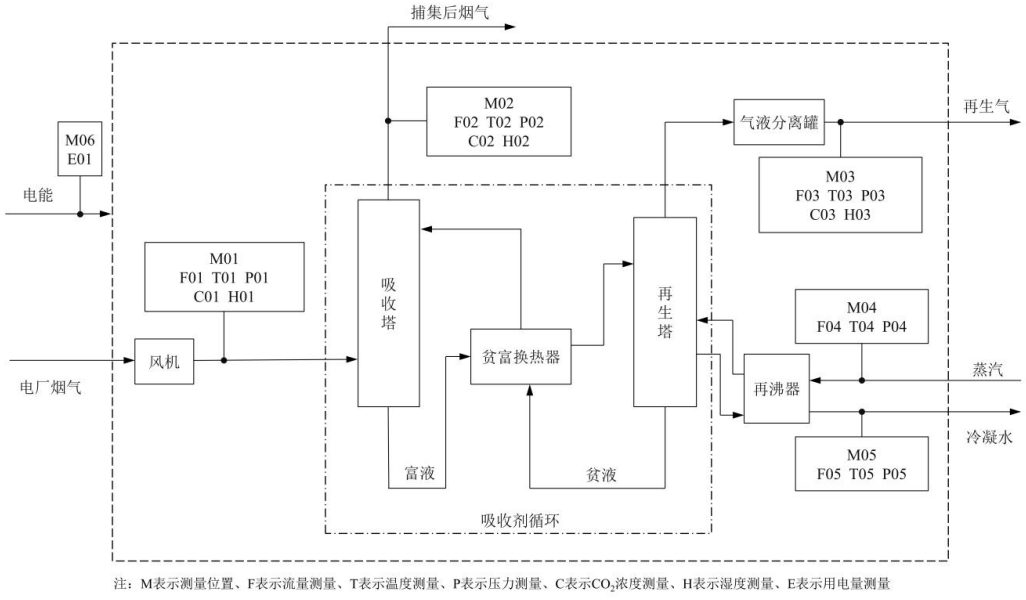


图 2 测试边界与测量位置

如图 2 所示，测试边界覆盖碳捕集系统实现烟气中 CO_2 捕集、再生气产出的工艺过程。烟气测量位置在吸收塔进口和出口的管段；再生气测量位置在再生塔气液分离完成后，进入压缩机（如有）之前的管段；换热量相关参数测量位置在蒸汽进入再沸器前，以及冷凝水离开再沸器的管段。用电量测量位置在碳捕集系统供电回路进线端，计入范围包括风机、贫液泵、富液泵、其他工艺循环泵、电伴热及能量回收装置等用电设备。

7.2.2 测量位置的主要测量参数

在吸收塔进、出口测量烟气流量、CO_2浓度、温度、压力和湿度参数；在气液分离罐后、压缩机前（如有）测量再生气流量、CO_2浓度、温度、压力和湿度参数；在再沸器进、出口分别测量蒸汽和冷凝水的流量、温度、压力参数；在对应供电回路进线端测量有功电能，各测量位置及其测量参数详见表 3。

表 3　测量位置及测量参数

编号	测量位置	测量参数	关联计量特性
M01	吸收塔入口烟道	烟气流量、温度、压力、CO_2浓度、湿度	CO_2捕集率
M02	吸收塔出口烟道	捕集后烟气流量、温度、压力、CO_2浓度、湿度	CO_2捕集率
M03	再生塔气液分离后、压缩机前（如有）	再生气流量、温度、压力、CO_2纯度、湿度	CO_2纯度、单位时间捕集量
M04	再沸器入口	蒸汽流量、温度、压力	单位热能消耗
M05	再沸器出口	冷凝水流量、温度、压力	单位热能消耗
M06	供电回路进线端	有功电能	单位电能消耗

7.3　测试前准备

检查测量设备的检定或校准证书，确认设备名称、型号及编号与实物一致，检定或校准范围覆盖实际使用范围，计量性能满足测试要求，且设备处于规定的检定或复校周期内。对于尚未进行检定或校准的测量设备，应按附录 C 规定进行在线计量，并确保测量设备的准确度等级符合表 1 规定。

检查各测量设备的外观及连接状态，设备应无影响计量性能的损伤、变形或腐蚀，安装应牢固，信号连接线路应完好、连接可靠。

检查 DCS 的运行状态。各测量通道的组态参数、量程、计量单位及倍率设置应与配套仪表一致，数据通信、显示、存储及处理功能应正常。已写入 DCS 的修正值或修正系数应与相应测量设备检定/校准/在线计量结果一致。

烟气分析及 CO_2纯度测试设备运行前，应检查取样、过滤及预处理装置的工作状态，确认取样管路无堵塞、气密性良好，无影响测量结果的污染或积液。

碳捕集系统中气体（烟气、再生气）的湿基参数至干基参数的转换采用附录 I 规定的方法。

发现可能影响测量结果的异常情况时，应排除异常并复查确认后，再进行测试。

7.4 测试方法

7.4.1 CO_2 纯度

碳捕集系统正常运行期间应保持烟气和蒸汽连续供给，CO_2 纯度以 DCS 采集的再生气气液分离器出口的 CO_2 干基浓度示值表示。

7.4.2 CO_2 捕集率

碳捕集系统正常运行期间应保持烟气和蒸汽连续供给，分别测量吸收塔入口烟气干基流量、出口烟气干基流量以及对应位置 CO_2 干基浓度，并按式（1）计算 CO_2 捕集率：

$$\varphi=\left(1-\frac{Q_{\text{out}}\times C_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}\times C_{\text{in}}}\right)\times 100\% \qquad (1)$$

式中：

φ——CO_2 捕集率，%；

Q_{out}——标准状态下吸收塔出口烟气干基流量，Nm^3/h；

C_{out}——吸收塔出口烟气 CO_2 干基浓度，%；

Q_{in}——标准状态下吸收塔入口烟气干基流量，Nm^3/h；

C_{in}——吸收塔入口烟气 CO_2 干基浓度，%。

7.4.3 单位时间捕集量

碳捕集系统正常运行期间应保持烟气和蒸汽连续供给，通过测量再生气干基流量和 CO_2 纯度，按式（2）计算单位时间捕集量：

$$Q_{\text{m}}=C_{\text{pro}}\times Q_{\text{pro}}\times\frac{44}{22.4}\times 10^{-5} \qquad (2)$$

式中：

Q_{m}——单位时间捕集量，t/h；

C_{pro}——再生塔出口再生气 CO_2 纯度，%；

Q_{pro}——标准状态下再生塔出口再生气流量，Nm^3/h。

7.4.4 单位热能消耗

碳捕集系统正常运行期间应保持烟气和蒸汽连续供给，测量再沸器入口蒸汽和出口冷凝水的质量流量、温度、压力，以及单位时间捕集量。根据 GB/T 34060 规定确定测量位置蒸汽或冷凝水的比焓，并按式（3）计算单位热能消耗：

$$STEC=\frac{q_{\text{m,s}}\times h_{\text{s}}-q_{\text{m,c}}\times h_{\text{c}}}{Q_{\text{m}}}\times 10^{-6} \qquad (3)$$

式中：

$STEC$——捕集每吨 CO_2 消耗的热能，GJ/t；

$q_{m,s}$——输送到再沸器入口的蒸汽质量流量，kg/h；

$q_{m,c}$——来自再沸器出口的冷凝水质量流量，kg/h；

h_s——蒸汽的比焓，kJ/kg；

h_c——冷凝水的比焓，kJ/kg。

7.4.5 单位电能消耗

碳捕集系统正常运行期间应保持烟气和蒸汽连续供给。测试开始时，记录电能表起始示值。测试结束时，记录电能表终止示值，根据起止示值之差及配套电流互感器变比，确定测试期间的总有功电能，并按式（4）计算单位电能消耗：

$$SEC=\frac{E_2-E_1}{\Delta t\times Q_m} \quad (4)$$

式中：

SEC——捕集每吨 CO_2 消耗的电能，kW·h/t；

E_1——经倍率折算后的电能表起始示值，kW·h；

E_2——经倍率折算后的电能表终止示值，kW·h；

Δt——测试的记录时长，h。

注：Q_m此时取测试时段内单位时间捕集量的平均值。

7.5 数据处理与修约

7.5.1 数据处理

测试时长应根据测试目的确定，典型测试时长包括 72h、100h、500h、1000h。必要时，可根据实际需求调整测试时长。

各参数原始数据采样间隔应小于 15 min，且应采用等时间间隔采样。当测试时长较短时，宜保存更高频原始数据。测量结果取各采样时刻所得结果的算术平均值。

7.5.2 数据核验

碳捕集系统吸收侧和再生侧均具备测量条件时，应选取一段不少于 12h 的连续运行时段进行数据交叉核验，具体方法见附录 J。不具备数据交叉核验条件时，应在测试报告中注明未开展交叉核验。

7.5.3 数据修约

按本规范规定的测试要求测量和计算碳捕集系统的 CO_2 纯度、CO_2 捕集率、单位时间捕集量、单位热能消耗和单位电能消耗，并按 GB/T 8170 规定的方法及下述要求进行数据修约：

1）CO_2纯度保留 2 位小数，计量单位为%；

2）CO_2捕集率保留 2 位小数，计量单位为%；

3）单位时间捕集量保留 2 位小数，计量单位为 t/h；

4）单位热能消耗保留 2 位小数，计量单位为 GJ/t；

5）单位电能消耗保留 2 位小数，计量单位为 kW·h/t。

8 测试结果表达

8.1 原始记录

计量测试的原始记录应包含电厂燃烧后吸收法碳捕集系统能效计量测试所要求的必要信息，记录中列出的项目应准确填写。测量结果、数据和计算应在测试时予以记录，记录应包括测试人员和核验人员的签名和测试日期。

8.2 测试报告

8.2.1 应依据测试结果，出具客观、准确和规范的测试报告。测试报告应包括测试主要信息及相关数据。

8.2.2 测试报告至少应包括以下信息：

a）标题；

b）测试机构名称和地址；

c）报告的唯一性标识，每页和总页的标识；

d）受检单位、生产单位的名称和地址；

e）被测系统的描述；

f）进行测试的日期；

g）开展测试依据的技术规范；

h）测试所用测量仪器的溯源性及有效性说明；

i）测试结论；

j）测试环境的描述；

k）测试结果及测量不确定度的说明；

l）测试人员、报告审核人员和报告批准人员的签名；

m）测试结果仅对测试批有效的声明。

附录 A

测试原始记录内页参考格式（供参考）

记录编号		委托单位		测试日期	
被测系统名称		型号/规格		吸收剂名称	
测试依据	JJF XXXX—XXXX《电厂燃烧后吸收法碳捕集系统能效测试技术规范》				
测试时间段	____年__月__日__时__分 至 ____年__月__日__时__分			测试地点	
环境温度/℃		湿度/%RH		大气压/kPa	
测试使用的计量（基）标准装置/主要标准器/主要仪器					
测量设备名称		测量范围	不确定度/ 准确度等级/ 最大允许误差	证书编号	证书有效期至 （YYYY-MM-DD）
测试员：			核验员：		
日期：			日期：		

A.1 烟气流量

测量对象/参数	单位	读数1	读数2	读数3	读数4	读数5	读数6	平均值
读数时刻	/							/
烟气流量	m^3/h							
烟气 CO_2 干基浓度	%							
烟气温度	℃							
烟气压力	kPa							
烟气湿度	%RH							

测量对象/参数	单位	读数1	读数2	读数3	读数4	读数5	读数6	平均值
读数时刻	/							/
捕集后烟气流量	m^3/h							
捕集后烟气 CO_2 干基浓度	%							
捕集后烟气温度	℃							
捕集后烟气压力	kPa							
捕集后烟气湿度	%RH							

A.2 CO_2 纯度

测量项目	记录序号					
	1	2	3	4	5	6
CO_2 纯度（干基）/%						
平均值						
测试方法	□非分散红外吸收法（NDIR） □傅立叶变换红外光谱法（FTIR） □连续排放监测系统法（CEMS）					

A.3 换热量

参数	单位	读数1	读数2	读数3	读数4	读数5	读数6	平均值
读数时刻	/							/
蒸汽质量流量	kg/h							
加热蒸汽温度	℃							
蒸汽压力	kPa							
蒸汽比焓（查表）	kJ/kg							
冷凝水质量流量	kg/h							
冷凝水温度	℃							
冷凝水压力	kPa							
冷凝水比焓	kJ/kg							

A.4 用电设备有功电能

设备名称/位号	起始读数/kW·h	终止读数/kW·h	备注
烟气风机			
贫液泵/ 富液泵			
洗涤水泵/ 冷却水泵			
其他：_____			
总有功电能			Σ=____ kW·h

A.5 碳捕集系统能效

计算项目	数值	单位
CO_2 纯度		%
CO_2 捕集率		%
单位时间捕集量		t/h
单位热能消耗		GJ/t
单位电能消耗		kW·h/t

附录 B

测试报告内页参考格式（供参考）

报告编号：

测试环境条件及地点	温度/℃		地点	
	湿度/% RH		其他	
测试时间段	____年__月__日__时__分 至 ____年__月__日__时__分		持续时间/h	
测试使用的计量（基）标准装置/主要标准器/主要仪器				
测量设备名称	测量范围	不确定度/准确度等级/最大允许误差	证书编号	证书有效期至（YYYY-MM-DD）

测 试 数 据

碳捕集系统能效（是否进行数据交叉核验：□是 □否）

测量项目	单位	数值
CO_2 纯度	%	
CO_2 捕集率	%	
单位时间捕集量	t/h	
单位热能消耗	GJ/t	
单位电能消耗	kW·h/t	

附录 C

碳捕集系统在线计量的条件、项目和方法

C.1 在线计量条件

C.1.1 环境条件

1）温度：10℃～50 ℃；

2）湿度：20% RH～90% RH；

3）大气压：90 kPa～105kPa；

4）工作区域无明显空气对流、机械振动和电磁干扰。

C.2 在线计量用设备

在线计量时，可参考选用表 C.1 所列设备。

表 C.1 主要在线计量设备一览表

序号	仪器、设备名称	技术要求	用途	备注
1	标准铂电阻温度计	二等	测量温度参考值	也可采用满足技术要求的其他设备
2	电测设备（电桥或可测量电阻的数字多用表）	测量范围与标准铂电阻温度计相适应； 0.005 级及以上等级	与标准铂电阻温度计配套使用	
3	恒温槽	控温范围与被测温度测量系统相适应； 均匀性不超过 0.01 ℃； 波动性不超过 0.02 ℃/10 min	温度源	
4	压力标准器	压力范围覆盖被测压力测量系统； 0.05 级及以上等级	向压力测量系统输入端提供标准压力信号	可为活塞式压力计、液体压力计、数字压力计或其他满足要求的标准压力发生器
5	温度校验仪	温度模拟信号输出范围覆盖热电偶信号采集系统的测量范围； 最大允许误差：±0.5 ℃	向热电偶信号测量系统提供温度模拟信号	也可采用满足技术要求的标准铂电阻温度计、干井式计量炉、恒温槽或其他设备组合
6	湿度计	测量范围：5%RH～90%RH； 最大允许误差：±2%RH	测量湿度参考值	也可采用满足技术要求的其他设备

序号	仪器、设备名称	技术要求	用途	备注
7	湿度发生器	湿度控制范围：5%RH～95%RH； 测量腔稳定性优于 1%RH	湿度源	也可采用满足技术要求的其他设备
8	标准皮托管	皮托管系数 k=0.81～0.86； 1.0 级	测量流速参考值	也可采用满足技术要求的其他设备

C.3 在线计量项目和方法

应根据碳捕集系统中尚未进行检定或校准的测量设备情况选择相关的在线计量项目，可在碳捕集系统现场进行在线计量的项目包括：

1）温度测量系统

2）压力测量系统

3）湿度测量系统

4）CO_2 监测系统

5）流量测量系统

其中，温度测量系统、压力测量系统、湿度测量系统参照 JJF 1857、JJF 1858 进行在线计量；CO_2 监测系统参照 JJF 1585 进行在线计量；流量测量系统参照 JJG 835 进行在线计量。

C.3.1 温度测量系统在线计量

C.3.1.1 在线计量点确定

应根据实际温度测量范围合理确定在线计量范围和在线计量点，在线计量点原则上应覆盖测量范围且不少于 8 个，一组常用的温度在线计量点可为 20℃、40℃、60℃、80℃、100℃、110℃、120℃、140℃等。必要时，可根据实际使用情况调整或增加在线计量点。

C.3.1.2 在线计量步骤

1）将恒温槽置于被测系统测点旁，同时将被测温度测量系统的传感器从测点取出，保持其与原变送器及 DCS 系统的配套连接关系，并以 DCS 显示或记录的温度值作为被测系统示值，如图 C.1 所示。

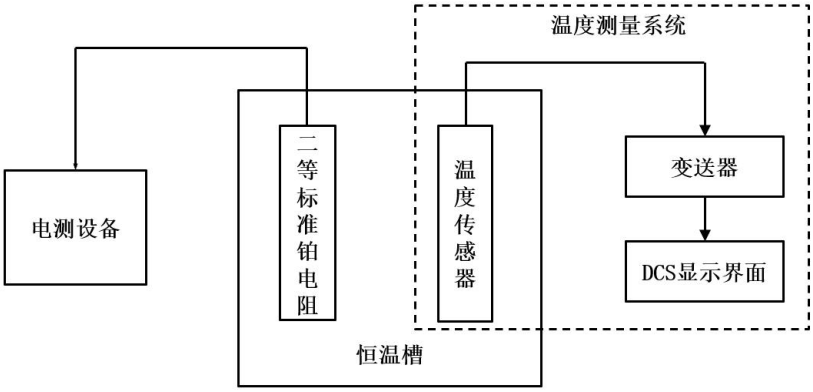


图 C.1 温度测量系统在线计量示意图

2）将标准铂电阻温度计与被测温度测量系统的传感器同时插入恒温槽内，插入深度一般不小于 100mm，并处于相同有效温度区域内。

3）设定在线计量点，使恒温槽有效区域内温度达到规定的在线计量点温度，并且达到稳定状态；

4）按顺序读取和记录电测系统和被测测量系统的温度示值，每个在线计量点至少记录 3 次，并计算其平均值；

5）更换在线计量点，重复 3）~4）的在线计量步骤；

6）完成全部在线计量点测量后，计算各在线计量点的示值误差。现场将在线计量结果或修正系数写入 DCS，并至少选取 2 个在线计量点进行验证。

C.3.2 压力测量系统在线计量

C.3.2.1 在线计量点确定

应根据实际压力测量范围合理确定在线计量范围和在线计量点。在线计量点原则上应覆盖测量范围且不少于 5 个，并包含常用工作压力点。必要时，可根据实际使用情况调整或增加在线计量点。

C.3.2.2 在线计量步骤

1）将压力发生装置及压力标准器设置于被测系统测点旁，被测压力变送器从测点取出，保持其与原 DCS 的配套连接关系，并以 DCS 显示的压力值作为被测系统示值。如图 C.2 所示。

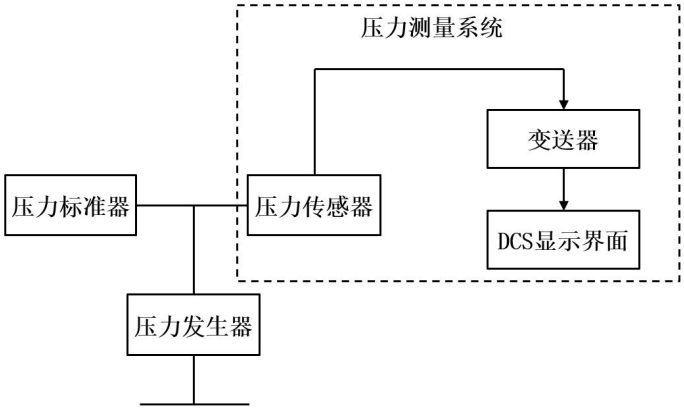


图 C.2 压力测量系统在线计量示意图

2）将压力标准器与被测压力测量通道可靠连接，并尽量使标准器压力参考位置与被测压力变送器处于同一水平高度；连接完成后检查管路及接头的密封性，确认无泄漏后进行校准。

3）从测量范围下限开始，按压力逐级增加的顺序向被测压力测量系统施加标准压力。各在线计量点压力达到稳定状态后，分别记录压力标准器示值和被测压力测量系统示值。校准介质应采用洁净、干燥且对被测设备无腐蚀作用的气体。

4）完成全部在线计量点测量后，计算各在线计量点的示值误差。现场将在线计量结果或修正系数写入 DCS，并至少选取 2 个在线计量点进行验证。

C.3.3 湿度测量系统在线计量

C.3.3.1 在线计量点确定

应不少于 3 个常温下（20℃）在线计量点。必要时，可根据实际使用情况调整或增加在线计量点。

C.3.3.2 在线计量步骤

常温 （20℃）下的湿度在线计量：

1）将被测湿度测量系统的湿度传感器放入湿度发生器的测试腔，并密封传感器与测试腔的连接处，以 DCS 显示的湿度值作为被测系统示值。

2）在线计量时，先设定湿度发生器的温度值。当温度平衡后，再设定湿度发生器的湿度值，一般在线计量点按照低湿到高湿的顺序进行。待温湿度稳定后，读取湿度发生器示值及被测湿度测量系统的示值。

3）完成全部在线计量点测量后，计算各在线计量点的示值误差。现场将在线计量结果或修正系数写入 DCS，并至少选取 2 个在线计量点进行验证。

C.3.4 CO_2 监测系统在线计量

C.3.4.1 在线计量点确定

应根据监测点 CO_2 浓度范围合理确定校准范围和在线计量点。在线计量点原则上应取满量程的约 20%、50%、80%。必要时，可根据实际使用情况调整或增加在线计量点。

C.3.4.2 在线计量步骤

1）启动监测系统并预热至正常工作状态，并以 DCS 显示的 CO_2 浓度值作为被测系统示值。

2）向系统通入零气，待示值稳定后进行零点校准，确认 DCS 显示值回零；

3）向系统通入浓度约为满量程 20%、50%和 80%的 CO_2 标准气体。每种浓度的标准气体分别通入 3 次，待示值稳定后记录 DCS 显示值，取 3 次示值的算术平均值作为该在线计量点的被测值。

4）完成全部在线计量点测量后，计算各在线计量点的示值误差。现场将在线计量结果或修正系数写入 DCS，并至少选取 2 个在线计量点进行验证。

C.3.5 流量测量系统在线计量

C.3.5.1 速度-面积法现场校准

1）测量断面的选择

测量断面应设置在气流稳定的垂直直管段，距上游弯头、阀门、变径管等扰动部件不小于 6 倍管道直径，距下游上述部件不小于 3 倍管道直径。测量断面与被在线计量流量计之间不应存在气体分流、汇入或泄漏。

2）采样点的布置和数量

如图 C.3 所示，对于圆形烟道，将测量断面划分为若干等面积同心环，测点布置在各环等面积中心线与两条相互垂直直径线的交点上。环数及测点距管道内壁的距离按 GB/T 16157 确定；测点距内壁小于 25 mm 时，取 25 mm。测孔应设置在相应测量直径的延长线上。

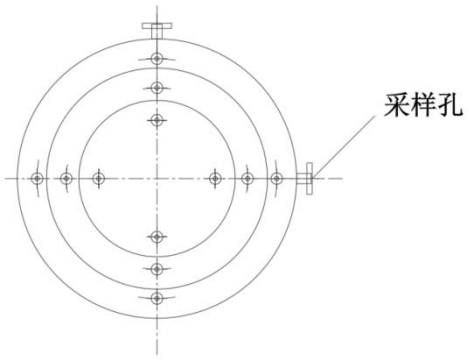
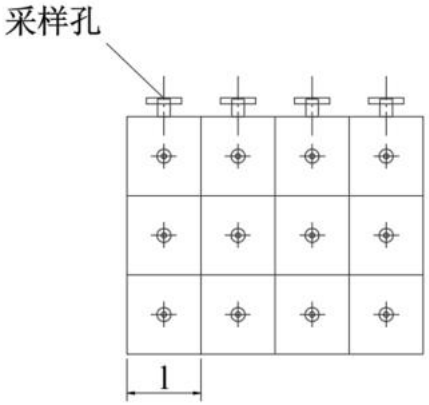
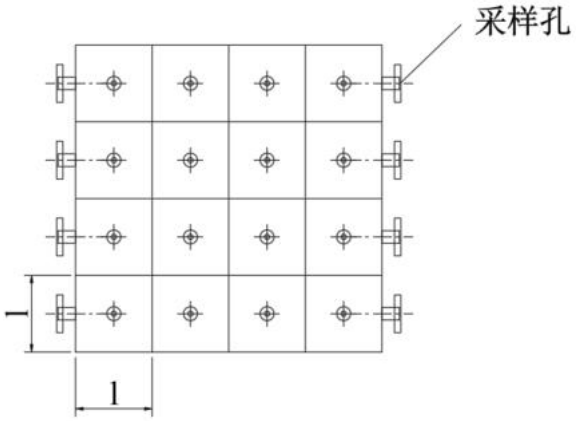


图 C.3 圆形断面的测定点

如图 C.4 所示，对于矩形烟道，将测量断面划分为若干等面积矩形小块，各小块中心作为测点。分区数量及尺寸按 GB/T 16157 确定，测孔应设置在能够覆盖各测点的测线上。



a） 长方形断面的测定点



b） 正方形断面的测定点

图 C.4 矩形断面的测定点

3）在线计量步骤

a）根据测量断面的实测尺寸确定有效流通面积，绘制测点布置图，并在标准皮托管测杆上标记各测点对应的插入深度。

b）将标准皮托管全压接口、静压接口分别与微差压计的正压端、负压端连接，检查测压孔、连接管路及接头，确认无堵塞、积液和泄漏，并检查和调整微差压计零点。

c）待被测系统工况稳定后，将标准皮托管插入测孔并定位至测点，封闭测孔间隙，使全压孔迎向气流，测头轴线与气流方向的偏角不大于 10°。

d）待示值稳定后，读取并记录各测点的动压，每点重复测量一次，取平均值。同步记录 DCS 流量示值及各次断面测量的起止时刻。

e）采用测温仪、压力计及气压计分别测量烟气温度、静压和测点位置的大气压力。

采用烟气分析仪，按照 JJF 1585 规定的方法，分别测量取样气路加装和未加装冷凝除湿装置时的烟气含氧量，根据干、湿烟气含氧量计算水分含量。

f）采用烟气分析仪测定烟气中气体组分，按 GB/T 16157 规定的公式计算测量状态下的湿烟气密度及流量标准值。

g）重复进行断面测量，取得不少于 6 组不同工况下流量标准值及对应时段的 DCS 平均流量示值，在线计量工况宜覆盖系统使用流量范围。

h）完成全部在线计量点测量后，计算各在线计量点的示值误差。现场将在线计量结果或修正系数写入 DCS，并至少选取 2 个在线计量点进行验证。

附录 D

CO_2 纯度测量结果不确定度评定示例

D.1 测量模型

CO_2 纯度的测试位置为碳捕集系统气液分离器出口后、压缩机前（如有），按式（D.1）计算：

$$C_{pro}=C_m \tag{D.1}$$

式中：

C_{pro}——CO_2 纯度，%；

C_m ——DCS 采集的干基 CO_2 浓度结果，%。

根据 GUM 法，合成标准不确定度表示为：

$$u_c^2(C_{pro})=u_R^2(C_{pro})+[c_1\cdot u_B(C_m)]^2 \tag{D.2}$$

式中：

$u_R(C_{pro})$——测试重复性引入的标准不确定度，%；

c_1——干基 CO_2 浓度测试值的灵敏系数；

D.2 灵敏系数

根据式（D.1），干基 CO_2 浓度测试值C_m的灵敏系数为：

$$c_1=\frac{\partial C_{pro}}{\partial C_m}=1 \tag{D.3}$$

D.3 测量结果的不确定度评定

D.3.1 不确定度的 A 类评定

对 CO_2 纯度进行 10 次独立测量，测量结果如表 D.1。

表 D.1 CO_2 纯度 10 次独立测量结果

测试次数	CO_2 纯度/%
1	99.46
2	99.50
3	99.48
4	99.53
5	99.51
6	99.47
7	99.52
8	99.49
9	99.54

测试次数	CO_2 纯度/%
10	99.50
平均值	99.50
实验标准偏差	0.02582

用贝塞尔公式计算单次独立测试结果的实验标准偏差，得到重复性引入的标准不确定度：

$$u_R(C_{pro})=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10}(C_{pro,i}-\overline{C}_{pro})^2}{10-1}}=0.02582\% \quad (D.4)$$

式中：

$C_{pro,i}$——第 i 次独立测试的 CO_2 纯度结果，%；

$\overline{C}_{pro}$ ——10 次独立测试结果的算术平均值，%。

D.3.2 不确定度的 B 类评定

二氧化碳红外气体分析仪的最大允许误差为±2%FS。本例分析仪量程为（0～100）%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，DCS 采集的干基 CO_2 浓度结果 C_m 标准不确定度为 1.00%。根据式（D.3），灵敏系数为 1，DCS 采集的干基 CO_2 浓度结果 C_m 引入的不确定度分量为 1.00%。

D.3.3 合成标准不确定度

CO_2 纯度测量标准不确定度一览表见表 D.2。

表 D.2 CO_2 纯度测量标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度/%	灵敏系数	输出不确定度分量/%
1	$u_R(C_{pro})$	0.02582	1	0.02582
2	$u_B(C_m)$	1.00000	1	1.00000

根据式（D.2），合成标准不确定度为：

$$u_c(C_{pro})=\sqrt{0.02582^2+1.00000^2}\ \%=1.00033\% \quad (D.5)$$

D.3.4 扩展不确定度

取 k=2，则 CO_2 纯度测试结果的扩展不确定度为：

$$U(C_{pro})=k\cdot u_c(C_{pro})=2.00\% \quad (D.6)$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}(C_{pro})=\frac{k\cdot u_c(C_{pro})}{\overline{C}_{pro}}\times 100\%=2.01\% \quad (D.7)$$

附录 E

CO_2 捕集率测量结果不确定度评定示例

E.1 测量模型

CO_2 捕集率的测量位置为碳捕集系统吸收塔进口及出口, 按式（E.1）、（E.2）计算：

$$\varphi=(1-\frac{Q_{\text{out}}\times C_{\text{out}}}{Q_{\text{in}}\times C_{\text{in}}})\times 100\% \tag{E.1}$$

$$Q_i=Q_{\text{d},i}\frac{P_i}{P_{\text{N}}}\frac{T_{\text{N}}}{T_i}=Q_{\text{w},i}\frac{P_i-\frac{\varphi_{\text{RH},i}}{100}P_{\text{sat}}(T_i)}{P_{\text{N}}}\frac{T_{\text{N}}}{T_i} \tag{E.2}$$

将式（E.2）代入式（E.1），展开得到：

$$\varphi=(1-\frac{Q_{\text{w,out}}[P_{\text{out}}-\frac{\varphi_{\text{RH,out}}}{100}P_{\text{sat}}(T_{\text{out}})]T_{\text{in}}C_{\text{out}}}{Q_{\text{w,in}}[P_{\text{in}}-\frac{\varphi_{\text{RH,in}}}{100}P_{\text{sat}}(T_{\text{in}})]T_{\text{out}}C_{\text{in}}})\times 100\% \tag{E.3}$$

式中：

φ ——CO_2 捕集率，%；

$Q_{\text{w},i}$——工况湿基体积流量，m^3/h；

$Q_{\text{d},i}$——工况干基体积流量，m^3/h；

Q_{in}——标准状态下吸收塔入口烟气干基流量，Nm^3/h；

Q_{out}——标准状态下吸收塔出口烟气干基流量，Nm^3/h；

C_{in} ——吸收塔入口烟气 CO_2 干基浓度，%；

C_{out}——吸收塔出口烟气 CO_2 干基浓度，%；

$\varphi_{\text{RH},i}$——气体相对湿度，%RH；

P_i ——绝对压力，kPa；

T_i ——热力学温度，K；

$P_{\text{sat}}(T_i)$——对应温度的饱和水蒸汽压力，kPa；

P_{N} ——标准状态压力，取 101.325 kPa；

T_{N} ——标准状态温度，取 273.15 K。

注：i 取 in、out，分别代表吸收塔入口、出口。

根据 GUM 法，本例将测试重复性与各 B 类分量按不相关处理，合成标准不确定度为：

$$\begin{aligned}u_{\text{c}}^2(\varphi)=&u_{\text{R}}^2(\varphi)+[c_1u(Q_{\text{w,in}})]^2+[c_2u(Q_{\text{w,out}})]^2+[c_3u(P_{\text{in}})]^2+[c_4u(P_{\text{out}})]^2\\&+[c_5u(T_{\text{in}})]^2+[c_6u(T_{\text{out}})]^2+[c_7u(\varphi_{\text{RH,in}})]^2+[c_8u(\varphi_{\text{RH,out}})]^2\\&+[c_9u(C_{\text{in}})]^2+[c_{10}u(C_{\text{out}})]^2+[c_{11}u(P_{\text{sat}}(T_{\text{in}}))]^2\\&+[c_{12}u(P_{\text{sat}}(T_{\text{out}}))]^2\end{aligned} \tag{E.4}$$

式中：

$u_R(\varphi)$ ——测试重复性引入的标准不确定度；

c_1～c_{12} ——各输入量的灵敏系数。

E.2 灵敏系数

a）吸收塔入口及出口工况湿基体积流量的灵敏系数分别为：

$$c_1=\frac{\partial\varphi}{\partial Q_{w,in}}=\frac{100Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}^2[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}} \tag{E.5}$$

$$c_2=\frac{\partial\varphi}{\partial Q_{w,out}}=-\frac{100[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}} \tag{E.6}$$

b）吸收塔入口及出口绝对压力的灵敏系数分别为：

$$c_3=\frac{\partial\varphi}{\partial P_{in}}=\frac{100Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]^2T_{out}C_{in}} \tag{E.7}$$

$$c_4=\frac{\partial\varphi}{\partial P_{out}}=-\frac{100Q_{w,out}T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}} \tag{E.8}$$

c）吸收塔入口及出口热力学温度的灵敏系数分别为：

$$c_5=\frac{\partial\varphi}{\partial T_{in}}=-\frac{100Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]^2T_{out}C_{in}} \times[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})+\frac{T_{in}\varphi_{RH,in}}{100}\frac{dP_{sat}(T_{in})}{dT_{in}}] \tag{E.9}$$

$$c_6=\frac{\partial\varphi}{\partial T_{out}}=\frac{100Q_{w,out}T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}^2C_{in}} \times[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})+\frac{T_{out}\varphi_{RH,out}}{100}\frac{dP_{sat}(T_{out})}{dT_{out}}] \tag{E.10}$$

d）吸收塔入口及出口相对湿度的灵敏系数分别为：

$$c_7=\frac{\partial\varphi}{\partial\varphi_{RH,in}}=-\frac{Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}C_{out}P_{sat}(T_{in})}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]^2T_{out}C_{in}} \tag{E.11}$$

$$c_8=\frac{\partial\varphi}{\partial\varphi_{RH,out}}=\frac{Q_{w,out}T_{in}C_{out}P_{sat}(T_{out})}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}} \tag{E.12}$$

e）吸收塔入口及出口 CO_2 干基浓度的灵敏系数分别为：

$$c_9=\frac{\partial\varphi}{\partial C_{in}}=\frac{100Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}C_{out}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}^2} \tag{E.13}$$

$$c_{10}=\frac{\partial\varphi}{\partial C_{out}}=-\frac{100Q_{w,out}[P_{out}-\frac{\varphi_{RH,out}}{100}P_{sat}(T_{out})]T_{in}}{Q_{w,in}[P_{in}-\frac{\varphi_{RH,in}}{100}P_{sat}(T_{in})]T_{out}C_{in}} \tag{E.14}$$

f）吸收塔入口及出口饱和水蒸汽压力计算模型的灵敏系数分别为：

$$c_{11}=\frac{\partial\varphi}{\partial P_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{in}})}=-\frac{Q_{\mathrm{w,out}}[P_{\mathrm{out}}-\frac{\varphi_{\mathrm{RH,out}}}{100}P_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{out}})]T_{\mathrm{in}}C_{\mathrm{out}}\varphi_{\mathrm{RH,in}}}{Q_{\mathrm{w,in}}[P_{\mathrm{in}}-\frac{\varphi_{\mathrm{RH,in}}}{100}P_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{in}})]^2T_{\mathrm{out}}C_{\mathrm{in}}} \quad (E.15)$$

$$c_{12}=\frac{\partial\varphi}{\partial P_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{out}})}=\frac{Q_{\mathrm{w,out}}T_{\mathrm{in}}C_{\mathrm{out}}\varphi_{\mathrm{RH,out}}}{Q_{\mathrm{w,in}}[P_{\mathrm{in}}-\frac{\varphi_{\mathrm{RH,in}}}{100}P_{\mathrm{sat}}(T_{\mathrm{in}})]T_{\mathrm{out}}C_{\mathrm{in}}} \quad (E.16)$$

E.3 测量结果的不确定度评定

E.3.1 不确定度的 A 类评定

在相同工况下对碳捕集系统 CO_2 捕集率进行 10 次独立完整测试，测量结果见表 E.1。

表 E.1 CO_2 捕集率 10 次独立测量结果

测试次数	CO_2 捕集率/%
1	90.54
2	90.90
3	90.77
4	91.05
5	90.94
6	90.66
7	91.13
8	90.73
9	90.99
10	90.49
平均值	90.82
实验标准偏差	0.21659

采用贝塞尔公式计算实验标准偏差，得到测试重复性引入的标准不确定度：

$$u_{\mathrm{R}}(\varphi)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10}(\varphi_j-\overline{\varphi})^2}{10-1}}=0.21659\% \quad (E.17)$$

式中：

φ_j——第 j 次完整测试的 CO_2 捕集率，%；

$\overline{\varphi}$——10 次完整测试结果的算术平均值，$\overline{\varphi}$=90.82%。

E.3.2 不确定度的 B 类评定

对各测量量进行多次重复测量取其平均值，计算得到各灵敏系数和各测量量的不确定度分量。

a）工况湿基体积流量引入的不确定度分量

流量测量系统的最大允许误差取±7.5%读数，按正态分布估计，取包含因子 k=2。吸收塔入口及出口工况湿基体积流量标准不确定度分别为 4759.94385 m^3/h、4063.17360 m^3/h。根据式（E.5）、式（E.6），灵敏系数分别为 7.23223×10^{-5} 和 -8.47244×10^{-5} %/（m^3/h），引入的标准不确定度分量均为 0.344250 %。

b）绝对压力引入的不确定度分量

绝压测量系统准确度等级 0.5 级、量程（0～200）kPa，按正态分布估计，取包含因子 k=2，吸收塔入口及出口绝对压力标准不确定度均为 0.500000 kPa。根据式（E.7）、式（E.8），灵敏系数分别为 0.098775 和−0.096938 %/kPa，引入的标准不确定度分量分别为 0.049387 %和 0.048469 %。

c）热力学温度引入的不确定度分量

B 级铂热电阻的最大允许误差为±（0.3＋0.005|θ|）℃。在 45.3 ℃、40.6 ℃时，最大允许误差分别为±0.5265 K、±0.5030 K，按正态分布估计，取包含因子 k=2，吸收塔入口及出口热力学温度标准不确定度分别为 0.263250 K、0.251500 K。根据式（E.9）、式（E.10），灵敏系数分别为−0.074754 %/K 和 0.064253 %/K，引入的标准不确定度分量分别为 0.019679 %和 0.016160 %。

d）相对湿度引入的不确定度分量

相对湿度测量的最大允许误差为±2.0%RH，按正态分布估计，取包含因子 k=2，吸收塔入口及出口相对湿度标准不确定度均为 1.00%RH。根据式（E.11）、式（E.12），灵敏系数分别为−0.009624 和 0.007391 %/（%RH），引入的标准不确定度分量分别为 0.009624 %和 0.007391 %。

e）CO_2 干基浓度引入的不确定度分量

吸收塔入口、出口分析器量程（0～20）%和（0～5）%，最大允许误差为±2%FS，绝对误差限分别为±0.40 %和±0.10 %。按正态分布估计，取包含因子 k=2，吸收塔入口及出口 CO_2 干基浓度标准不确定度分别为 0.200000 %和 0.050000 %。根据式（E.13）、式（E.14），灵敏系数分别为 0.705069 和−6.780492，引入的标准不确定度分量分别为 0.141014 %和 0.339025 %。

f）饱和水蒸汽压力计算模型引入的不确定度分量

在（313.75～318.45）K，饱和压力公式的相对不确定度估计范围保守取±0.03%。按照正态分布估计，取包含因子 k=2，吸收塔入口及出口饱和水蒸汽压力计算模型标准不确定度分别为 0.00146151 kPa、0.00114359 kPa。根据式（E.15）、式（E.16），灵敏系数分别为−0.091861 和 0.086469 %/kPa，引入的标准不确定度分量分别为 0.00013426 %和 0.00009889 %。

E.3.3 合成标准不确定度

CO_2 捕集率测量标准不确定度一览表见表 E.2。

表 E.2 CO_2 捕集率测量标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出分量 /%
1	$u_R(\varphi)$	0.216590 %	1	0.216590
2	$Q_{w,in}$	4759.943847 m³/h	7.23223×10^{-5}	0.344250
3	$Q_{w,out}$	4063.173603 m³/h	-8.47244×10^{-5}	0.344250
4	P_{in}	0.500000 kPa	0.098775	0.049387
5	P_{out}	0.500000 kPa	−0.096938	0.048469
6	T_{in}	0.263250 K	−0.074754	0.019679
7	T_{out}	0.251500 K	0.064253	0.016160
8	$\varphi_{RH,in}$	1.000000 %RH	−0.009624	0.009624
9	$\varphi_{RH,out}$	1.000000 %RH	0.007391	0.007391
10	C_{in}	0.200000 %	0.705069	0.141014
11	C_{out}	0.050000 %	−6.780492	0.339025
12	$P_{sat}(T_{in})$	0.00146151 kPa	−0.091861	0.00013426
13	$P_{sat}(T_{out})$	0.00114359 kPa	0.086469	0.00009889

根据式（E.4），合成标准不确定度为：

$$u_c(\varphi)=0.65140911\%=0.65141\% \quad \text{（E.18）}$$

E.3.4 扩展不确定度

取 $k=2$，则 CO_2 捕集率测量结果的扩展不确定度为：

$$U(\varphi)=k\cdot u_c(\varphi)=1.30\% \quad \text{（E.19）}$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}(\varphi)=\frac{k\cdot u_c(\varphi)}{\overline{\varphi}}\times100\%=1.43\% \quad \text{（E.20）}$$

附录 F

单位时间捕集量测量结果不确定度评定示例

F.1 测量模型

单位时间捕集量的测量位置为捕集系统再生塔气液分离器出口，按式（F.1）计算：

$$Q_{\mathrm{m}}=C_{\mathrm{pro}}\times Q_{\mathrm{pro}}\times\frac{44}{22.4}\times10^{-5} \tag{F.1}$$

式中：

Q_{m}——单位时间捕集量，t/h；

C_{pro}——再生气 CO_2 纯度，%；

Q_{pro}——标准状态下再生气流量，Nm^3/h。

式（F.1）中，标准状态下再生气流量Q_{pro}，可表示为：

$$Q_{\mathrm{pro}}=Q_{\mathrm{pro,a}}\times\frac{P_1}{P_{\mathrm{N}}}\times\frac{T_{\mathrm{N}}}{T_1} \tag{F.2}$$

式中：

$Q_{\mathrm{pro,a}}$——测试工况状态下再生气流量（干基），m^3/h；

P_1 ——再生气绝对压力，kPa；

P_{N} ——标准大气压，101.325 kPa；

T_1 ——再生气热力学温度，$T_1=273.15+\theta_1$，θ_1 为再生气摄氏温度，℃；

T_{N} ——标况热力学温度，273.15 K。

式（F.2）中，测试工况状态下再生气流量$Q_{\mathrm{pro,a}}$，可表示为：

$$Q_{\mathrm{pro,a}}=Q_{\mathrm{pro,a,w}}\times(1-\frac{P_{\mathrm{sat}}(T_1)}{P_1}) \tag{F.3}$$

式中：

$Q_{\mathrm{pro,a,w}}$ ——测试工况状态下再生气流量（湿基），m^3/h；

$P_{\mathrm{sat}}(T_1)$——再生气温度对应的饱和水蒸汽压力值，kPa。

根据 GUM 法，合成标准不确定度可表示为：

$$\begin{aligned}u_{\mathrm{c}}^2(Q_{\mathrm{m}})=u_{\mathrm{R}}^2(Q_{\mathrm{m}})+\left[c_1\cdot u\left(Q_{\mathrm{pro,a,w}}\right)\right]^2+[c_2\cdot u(P_1)]^2+[c_3\cdot u(T_1)]^2\\+[c_4\cdot u(P_{\mathrm{sat}})]^2+\left[c_5\cdot u\left(C_{\mathrm{pro}}\right)\right]^2\end{aligned} \tag{F.4}$$

式中：

$u_R(Q_m)$ ——单位时间捕集量重复测量引入的不确定度分量，t/h；

$c_1 \sim c_5$ ——各测量量引入不确定度的灵敏系数。

F.2 灵敏系数

测试工况状态下再生气流量（湿基）的灵敏系数为：

$$c_1=\frac{\partial Q_m}{\partial Q_{pro,a,w}}=\frac{44\times[P_1-P_{sat}(T_1)]\times T_N\times C_{pro}}{22.4\times P_N\times T_1\times 10^5} \quad (F.5)$$

再生气绝对压力的灵敏系数为：

$$c_2=\frac{\partial Q_m}{\partial P_1}=\frac{44\times Q_{pro,a,w}\times T_N\times C_{pro}}{22.4\times P_N\times T_1\times 10^5} \quad (F.6)$$

再生气热力学温度的灵敏系数为：

$$c_3=\frac{\partial Q_m}{\partial T_1}=-\frac{44\times Q_{pro,a,w}\times T_N\times C_{pro}}{22.4\times P_N\times T_1^{\,2}\times 10^5}\left[P_1-P_{sat}(T_1)+T_1\frac{dP_{sat}(T_1)}{dT_1}\right] \quad (F.7)$$

饱和水蒸汽计算模型的灵敏系数为：

$$c_4=\left.\frac{\partial Q_m}{\partial P_{sat}}\right|_{T_1}=-\frac{44\times Q_{pro,a,w}\times T_N\times C_{pro}}{22.4\times P_N\times T_1\times 10^5} \quad (F.8)$$

再生气 CO_2 纯度的灵敏系数为：

$$c_5=\frac{\partial Q_m}{\partial C_{pro}}=\frac{44\times Q_{pro,a,w}[P_1-P_{sat}(T_1)]\times T_N}{22.4\times P_N\times T_1\times 10^5} \quad (F.9)$$

F.3 测量结果的不确定度评定

F.3.1 不确定度的 A 类评定

在相同工况下对碳捕集系统单位时间捕集量进行 10 次独立测试，测试结果见表 F.1。

表 F.1 单位时间捕集量 10 次独立测量结果

测量次数	单位时间捕集量/（t/h）
1	23.16
2	23.17
3	22.97
4	22.92
5	23.01
6	23.12
7	23.03
8	22.94
9	22.89

测量次数	单位时间捕集量/（t/h）
10	22.96
平均值	23.02
实验标准偏差	0.1009

采用贝塞尔公式计算实验标准偏差：

$$s(Q_{\mathrm{m}})=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10}(Q_{\mathrm{m},j}-\overline{Q}_{\mathrm{m}})^2}{10-1}}=0.1009\mathrm{t/h} \qquad (\mathrm{F.10})$$

$Q_{\mathrm{m},j}$——第 j 次测试结果；

$\overline{Q}_{\mathrm{m}}$——10 次测试结果的平均值。

F.3.2　不确定度的 B 类评定

对各测量量进行多次重复测量取其平均值，计算得到各灵敏系数和各测量量的不确定度分量。

a）测试工况状态下再生气流量（湿基）$Q_{\mathrm{pro,a,w}}$引入的不确定度分量

工况体积流量测量系统的最大允许误差为±7.5%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，测试工况状态下再生气流量（湿基）$Q_{\mathrm{pro,a,w}}$标准不确定度为 480.1875m^3/h。根据式（F.5），灵敏系数为 0.00180t/m^3，测试工况状态下再生气流量（湿基）$Q_{\mathrm{pro,a,w}}$引入的不确定度分量为 0.86434t/h。

b）再生气绝对压力 P_1 引入的不确定度分量

压力测量系统的最大允许误差为±0.5%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，再生气绝对压力 P_1 的标准不确定度为 0.2785kPa。根据式（F.6），灵敏系数为 c_2=0.21805t/（h·kPa），再生气绝对压力 P_1 引入的不确定度分量为 0.06073t/h。

c）再生气热力学温度 T_1 引入的不确定度分量

温度同时作用于工况与标况流量转换以及饱和压力计算。温度测量系统的最大允许误差为±0.22 K，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，再生气热力学温度 T_1 的标准不确定度为 0.11K。

根据 GB/T 34060 对饱和压力计算模型直接求导，令：

$$F=-B+\sqrt{B^2-4AC} \qquad (\mathrm{F.11})$$

由链式法则得：

$$\vartheta'=\frac{1}{T^*}\left[1-\frac{n_9}{(T/T^*-n_{10})^2}\right] \tag{F.12}$$

$$A'=(2\vartheta+n_1)\vartheta',B'=(2n_3\vartheta+n_4)\vartheta' \tag{F.13}$$

$$C'=(2n_6\vartheta+n_7)\vartheta' \tag{F.14}$$

$$F'=-B'+\frac{BB'-2A'C-2AC'}{\sqrt{B^2-4AC}} \tag{F.15}$$

式中，p^* =1MPa，T^* =1K；ϑ为无量纲转换温度；n_1～n_{10}为无量纲系数。

饱和压力对再生气热力学温度的导数为：

$$\frac{\mathrm{d}P_{\mathrm{sat}}}{\mathrm{d}T}=4P_{\mathrm{sat}}(T_1)\left(\frac{C'}{C}-\frac{F'}{F}\right) \tag{F.16}$$

根据式（F.7），灵敏系数为 c_3=−0.14503t/（h·K），再生气热力学温度 T_1 的不确定度分量为 0.01595t/h。

d）饱和水蒸汽压力计算模型引入的不确定度分量

在 308.97 K 附近，饱和压力公式的相对不确定度估计范围保守取±0.03%。按照正态分布估计，取包含因子 k=2，公式引入的标准不确定度为 0.00088kPa。根据式（F.8），灵敏系数为 c_4=−0.21805t/(h·kPa)，饱和压力计算模型引入的不确定度分量为 0.00019t/h。

e）CO_2 纯度引入的不确定度分量

二氧化碳红外气体分析器的最大允许误差为±2%FS，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，再生气 CO_2 纯度 C_{pro} 的标准不确定度为 1%。根据式（F.9），灵敏系数为 c_5=0.23143t/（h·%），再生气 CO_2 纯度引入的不确定度分量为 0.23143t/h。

F.3.3　合成标准不确定度

单位时间捕集量测量标准不确定度一览表见表 F.2。

表 F.2　单位时间捕集量测量标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出不确定度分量/（t/h）
1	$u_{\mathrm{R}}(Q_{\mathrm{m}})$	0.1009t/h	1	0.1009t/h
2	$Q_{\mathrm{pro,a,w}}$	480.1875 m³/h	0.00180t/m³	0.86434t/h
3	P_1	0.2785kPa	0.21805t/（h·kPa）	0.06073t/h
4	T_1	0.11000 K	−0.14503t/（h·K）	0.01595t/h
5	$P_{\mathrm{sat}}(T_1)$	0.00088kPa	−0.21805t/（h·kPa）	0.00019t/h
6	C_{pro}	1%	0.23143t/（h·%）	0.23143t/h

根据式（F.4），单位时间捕集量的合成标准不确定度为：

$$u_c(Q_m)=0.90\text{t/h} \quad \text{（F.17）}$$

F.3.4 扩展不确定度

取 $k=2$，则单位时间捕集量测量结果扩展不确定度为：

$$U(Q_m)=k\cdot u_c(Q_m)=1.80\text{t/h} \quad \text{（F.18）}$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}(Q_m)=\frac{k\cdot u_c(Q_m)}{Q_m}=7.8\% \quad \text{（F.19）}$$

附录 G

单位热能消耗测量结果不确定度评定示例

G.1 测量模型

单位热能消耗的测量位置为碳捕集系统再生塔气液分离器出口及再沸器，按式（G.1）计算：

$$STEC=\frac{q_{m,s}\times h_s-q_{m,c}\times h_c}{Q_m}\times 10^{-6} \quad （G.1）$$

式中：

$STEC$——捕集每吨 CO_2 消耗的热能，GJ/t；

Q_m——单位时间捕集量，t/h；

$q_{m,s}$——输送到再沸器入口的蒸汽质量流量，kg/h；

$q_{m,c}$——来自再沸器出口的冷凝水质量流量，kg/h；

h_s——蒸汽的比焓，kJ/kg；

h_c——冷凝水的比焓，kJ/kg。

注：比焓基于测试位置温度、压力测量结果，按 GB/T 34060 规定方法获取。

根据 GUM 法，合成标准不确定度可表示为：

$$u_c^2(STEC)=u_R^2(STEC)+[c_1u(q_{m,s})]^2+[c_2u(q_{m,c})]^2+[c_3u(h_s)]^2+[c_4u(h_c)]^2+[c_5u(Q_m)]^2 \quad （G.2）$$

式中：

$u_R(STEC)$——单位热能消耗重复测量引入的不确定度分量，GJ/t；

c_1~ c_5 ——各测量量引入不确定度的灵敏系数。

G.2 灵敏系数

输送到再沸器入口的蒸汽质量流量的灵敏系数为：

$$c_1=\frac{\partial STEC}{\partial q_{m,s}}=\frac{h_s}{10^6\times Q_m} \quad （G.3）$$

来自再沸器出口的冷凝水质量流量的灵敏系数为：

$$c_2=\frac{\partial STEC}{\partial q_{m,c}}=-\frac{h_c}{10^6\times Q_m} \quad （G.4）$$

蒸汽的比焓的灵敏系数为：

$$c_3=\frac{\partial STEC}{\partial h_s}=\frac{q_{m,s}}{10^6\times Q_m} \quad （G.5）$$

冷凝水的比焓的灵敏系数为：

$$c_4=\frac{\partial STEC}{\partial h_c}=-\frac{q_{m,c}}{10^6\times Q_m} \quad (G.6)$$

单位时间捕集量的灵敏系数为：

$$c_5=\frac{\partial STEC}{\partial Q_m}=-\frac{q_{m,s}\times h_s-q_{m,c}\times h_c}{10^6\times Q_m^2} \quad (G.7)$$

G.3 测量结果的不确定度评定

G.3.1 不确定度的 A 类评定

在相同工况下对碳捕集系统单位热能消耗进行 10 次独立测量，测量结果见表 G.1。

表 G.1 单位热能消耗 10 次独立测量结果

测量次数	单位热能消耗/（GJ/t）
1	3.19580
2	3.20703
3	3.19369
4	3.19054
5	3.20440
6	3.17738
7	3.18783
8	3.19940
9	3.19215
10	3.19608
平均值	3.19443
实验标准偏差	0.00845

采用贝塞尔公式计算实验标准偏差：

$$s(STEC)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10}(STEC_j-\overline{STEC})^2}{10-1}}=0.00845\text{GJ/t} \quad (G.8)$$

$STEC_j$——第 j 次测试结果；

$\overline{STEC}$——10 次测试结果的平均值。

G.3.2 不确定度的 B 类评定

对各测量量进行多次重复测量取其平均值，计算得到各灵敏系数和各测量量的不确定度分量。

a）输送到再沸器入口的蒸汽质量流量$q_{m,s}$引入的不确定度分量

蒸汽流量测量系统的最大允许误差为±2.0%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，输送到再沸器入口的蒸汽质量流量$q_{m,s}$标准不确定度为 314.52kg/h。根据式（G.3），灵敏系数为 1.19026×10^{-4}（GJ/t）/（kg/h），输送到再沸器入口的蒸汽质量流量$q_{m,s}$引入的不确定度分量为 0.03744GJ/t。

b）来自再沸器出口的冷凝水质量流量$q_{m,c}$引入的不确定度分量

冷凝水流量测量系统的最大允许误差为±2.0%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，来自再沸器出口的冷凝水质量流量$q_{m,c}$标准不确定度为 314.39kg/h。根据式（G.4），灵敏系数为 -1.75693×10^{-5}（GJ/t）/（kg/h），来自再沸器出口的冷凝水质量流量$q_{m,c}$引入的不确定度分量为 0.00552GJ/t。

c）蒸汽的比焓h_s引入的不确定度分量

蒸汽温度、压力测量设备的最大允许误差分别为±0.44 ℃和±0.5%，均按正态分布、取包含因子 k=2，蒸汽温度标准不确定度为 0.22K，蒸汽压力标准不确定度为 0.95kPa。

根据 GB/T 34060 规定公式求偏导，得

$$\frac{\partial h_s}{\partial T_s}=2.304035\text{kJ/(kg·K)} \qquad \text{（G.9）}$$

式中：

T_s ——蒸汽温度；

$$\frac{\partial h_s}{\partial P_s}=-0.095086141\text{kJ/(kg·kPa)} \qquad \text{（G.10）}$$

式中：

P_s ——蒸汽压力。

在本示例温度、压力条件下，蒸汽比焓计算方法引入的相对标准不确定度为 0.15%，比焓计算方法引入的标准不确定度为 4.10996kJ/kg，蒸汽比焓的标准不确定度为：

$$u_B(h_s)=\sqrt{\left[\frac{\partial h_s}{\partial T_s}u_B(T_s)\right]^2+\left[\frac{\partial h_s}{\partial P_s}u_B(P_s)\right]^2+u^2(h_{s,cal})}=4.14209\text{kJ/kg} \qquad \text{（G.11）}$$

式中：

$u(h_{s,cal})$ ——蒸汽比焓计算方法引入的标准不确定度。

根据式（G.5），灵敏系数为 1.36629×10^{-3}（GJ/t）/（kJ/kg），蒸汽比焓引入的标准不确定度分量为 0.00566GJ/t。

d）冷凝水的比焓h_c引入的不确定度分量

冷凝水温度、压力测量设备的最大允许误差分别为±0.34 ℃和±0.5%，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，冷凝水温度标准不确定度为 0.17K，冷凝水压力标准不确定度为 0.58kPa。

根据 GB/T 34060 规定公式求偏导，得

$$\frac{\partial h_{\mathrm{c}}}{\partial T_{\mathrm{c}}}=4.21204\mathrm{kJ/(kg\cdot K)} \qquad \text{（G.12）}$$

式中：

T_{c} ——冷凝水温度。

$$\frac{\partial h_{\mathrm{c}}}{\partial P_{\mathrm{c}}}=0.00076\mathrm{kJ/(kg\cdot kPa)} \qquad \text{（G.13）}$$

式中：

P_{c} ——冷凝水压力。

在本示例温度、压力条件下，冷凝水比焓计算方法引入的最大允许误差为±0.15 kJ/kg，按照正态分布估计，取包含因子 k=2，冷凝水比焓计算方法引入的标准不确定度为 0.075kJ/kg，冷凝水比焓的标准不确定度为：

$$u_{\mathrm{B}}(h_{\mathrm{c}})=\sqrt{\left[\frac{\partial h_{\mathrm{c}}}{\partial T_{\mathrm{c}}}u_{\mathrm{B}}(T_{\mathrm{c}})\right]^2+\left[\frac{\partial h_{\mathrm{c}}}{\partial P_{\mathrm{c}}}u_{\mathrm{B}}(P_{\mathrm{c}})\right]^2+u^2(h_{\mathrm{c,cal}})}=0.71996\mathrm{kJ/kg} \qquad \text{（G.14）}$$

式中：

$u(h_{\mathrm{c,cal}})$ ——冷凝水比焓计算方法引入的标准不确定度。

根据式（G.6），灵敏系数为-1.36573×10^{-3}（GJ/t）/（kJ/kg），冷凝水比焓引入的标准不确定度分量为 0.00098GJ/t。

e）单位时间捕集量Q_{m}引入的不确定度分量

由附录 F 可得本示例单位时间捕集量标准不确定度分量为 0.90t/h。根据式（G.7），灵敏系数为−0.13863（GJ/t）/（t/h），单位时间捕集量Q_{m}引入的不确定度分量为 0.12477GJ/t。

G.3.3　合成标准不确定度

单位热能消耗测量标准不确定度一览表见表 G.2。

表 G.2　单位热能消耗测量标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出标准不确定度分量/（GJ/t）
1	$u_{\mathrm{R}}(STEC)$	0.00845GJ/t	1	0.00845

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出标准不确定度分量/（GJ/t）
2	$q_{m,s}$	314.52kg/h	1.19026×10^{-4}（GJ/t）/（kg/h）	0.03744
3	$q_{m,c}$	314.39kg/h	-1.75693×10^{-5}（GJ/t）/（kg/h）	0.00552
4	h_s	4.14209kJ/kg	1.36629×10^{-3}（GJ/t）/（kJ/kg）	0.00566
5	h_c	0.719964kJ/kg	-1.36573×10^{-3}（GJ/t）/（kJ/kg）	0.00098
6	Q_m	0.90t/h	−0.13863（GJ/t）/（t/h）	0.12477

根据式（G.2），单位热能消耗的合成标准不确定度为：

$$u_c(STEC)=0.13\text{GJ/t} \qquad \text{（G.15）}$$

G.3.4 扩展不确定度

取 $k=2$，则单位热能消耗测量结果扩展不确定度为：

$$U(STEC)=k\cdot u_c(STEC)=0.26\text{GJ/t} \qquad \text{（G.16）}$$

相对扩展不确定度为：

$$U_{rel}(STEC)=\frac{k\cdot u_c(STEC)}{STEC}=8.2\% \qquad \text{（G.17）}$$

附录 H

单位电能消耗测量结果不确定度评定示例

H.1 测量模型

单位电能消耗的测量位置为碳捕集系统风机、泵、伴热、能量回收装置等的电能计量点及再生塔气液分离器出口，按式（H.1）计算：

$$SEC=\frac{E_2-E_1}{\Delta t\times Q_{\mathrm{m}}} \tag{H.1}$$

式中：

SEC——捕集每吨 CO_2消耗的电能，kW·h/t；

E_1 ——经倍率折算后的电能表起始示值，kW·h；

E_2 ——经倍率折算后的电能表终止示值，kW·h；

Δt ——测试记录时长，h；

Q_{m} ——测试时段内单位时间捕集量的平均值，t/h。

根据 GUM 法，合成标准不确定度可表示为：

$$u_{\mathrm{c}}^2(SEC)=u_{\mathrm{R}}^2(SEC)+[c_1u(E_2-E_1)]^2+[c_2u(\Delta t)]^2+[c_3u_{\mathrm{B}}(Q_{\mathrm{m}})]^2 \tag{H.2}$$

式中：

$u_{\mathrm{R}}(SEC)$——完整测试重复性引入的标准不确定度；

c_1~ c_3——各测量量引入不确定度的灵敏系数。

H.2 灵敏系数

由式（H.1）可得各输入量的灵敏系数：

$$c_1=\frac{\partial \mathrm{SEC}}{\partial(E_2-E_1)}=\frac{1}{\Delta t\times Q_{\mathrm{m}}} \tag{H.3}$$

$$c_2=\frac{\partial \mathrm{SEC}}{\partial \Delta t}=-\frac{E_2-E_1}{\Delta t^2\times Q_{\mathrm{m}}} \tag{H.4}$$

$$c_3=\frac{\partial \mathrm{SEC}}{\partial Q_{\mathrm{m}}}=-\frac{E_2-E_1}{\Delta t\times Q_{\mathrm{m}}^2} \tag{H.5}$$

H.3 测量结果的不确定度评定

H.3.1 不确定度的 A 类评定

本例测试时长取 72 h，测试时段内单位时间捕集量平均值 23.02 t/h，对单位电能消耗进行 10 次独立测量，测量结果见表 H.1。

表 H.1 单位电能消耗 10 次独立测量结果

测试次数	单位电能消耗/（kW·h/t）
1	29.88
2	30.04
3	29.96
4	30.12
5	30.08
6	29.83
7	30.02
8	29.93
9	30.18
10	29.96
平均值	30.00
实验标准偏差	0.10883

采用贝塞尔公式计算实验标准偏差，得到测试重复性引入的标准不确定度：

$$u_{\mathrm{R}}(SEC)=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{10}(SEC_j-\overline{SEC})^2}{10-1}}=0.10883\ \mathrm{kW\cdot h/t} \qquad (H.6)$$

式中：

SEC_j——第 j 次完整测试结果；

$\overline{SEC}$ ——10 次完整测试结果的平均值。

H.3.2 不确定度的 B 类评定

对各测量量进行多次重复测量取其平均值，计算得到各灵敏系数和各测量量的不确定度分量。

a）电能增量引入的不确定度分量

本例采用 C 级电能表和 0.5S 级电流互感器配置：电压直接接入，三相平衡正弦负载，功率因数 0.9（滞后）；电能表在转折电流至最大电流之间，互感器在额定电流（20～120）%且二次负荷满足要求。

电能表最大允许误差±0.6%，互感器对有功电能的综合相对影响界限为±0.93%，按电能增量 49723.2 kW·h 计算上述影响；经倍率折算后的读数分辨力沿用 1 kW·h，两次取整误差分别在±0.5 kW·h 内均匀分布且不相关，差值的标准不确定度为 0.408248 kW·h。各分量见表 H.2。

表 H.2 电能增量的标准不确定度分量

来源	误差估计范围	标准不确定度 /（kW·h）
电能表	±0.6%	172.246217
电流互感器综合影响	±0.93%	266.981637
起、止读数取整	每次±0.5 kW·h	0.408248

将表 H.2 中分量按不相关合成，得到电能增量的标准不确定度：

$$u(E_2-E_1)=\sqrt{172.246217^2+266.981637^2+0.408248^2}=317.723340\ \text{kW} \quad (H.7)$$

根据式（H.3），灵敏系数 0.000603 /t，电能增量引入的不确定度分量为 0.191695 kW·h/t。

b）测试时长引入的不确定度分量

72 h 测试区间计时最大允许误差取±1 s，按均匀分布，测试时长标准不确定度为 0.000160375 h。根据式（H.4），灵敏系数−0.416667（kW·h/t）/h，测试时长引入的不确定度分量为 0.00006682 kW·h/t。

c）单位时间捕集量引入的不确定度分量

直接采用附录 F 中按正态分布评定的 B 类输出分量：流量 0.86434 t/h、压力 0.06073 t/h、温度 0.01595 t/h、饱和压力 0.00019 t/h、CO_2 纯度 0.23143 t/h，得：

$$u_B(Q_m)=\sqrt{0.86434^2+0.06073^2+0.01595^2+0.00019^2+0.23143^2}=0.89698721\ \text{t/h} \quad (H.8)$$

根据式（H.5），灵敏系数−1.303215（kW·h/t）/（t/h），单位时间捕集量引入的不确定度分量为 1.168967 kW·h/t。

H.3.3 合成标准不确定度

单位电能消耗测量标准不确定度一览表见表 H.3。

表 H.3 单位电能消耗测量标准不确定度一览表

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出分量 /（kW·h/t）
1	$u_R(SEC)$	0.108832 kW·h/t	1	0.108832
2	E_2-E_1	317.723340 kW·h	0.000603340 /t	0.191695
3	Δt	0.000160375 h	−0.416667 （kW·h/t）/h	0.00006682

序号	不确定度来源	标准不确定度	灵敏系数	输出分量/（kW·h/t）
4	Q_m	0.89698721 t/h	−1.303215（kW·h/t）/（t/h）	1.168967

根据式（H.2），合成标准不确定度为：

$$u_c(SEC)=\sqrt{u_R^2(SEC)+[c_1u(E_2-E_1)]^2+[c_2u(\Delta t)]^2+[c_3u_B(Q_m)]^2} \quad (H.9)$$

$$=1.18956923\ \text{kW·h/t}$$

H.3.4 扩展不确定度

取 $k=2$，则单位电能消耗测量结果的扩展不确定度为：

$$U(SEC)=k\cdot u_c(SEC)=2.4\ \text{kW·h/t} \quad (H.10)$$

相对扩展不确定度：

$$U_{rel}(SEC)=\frac{k\cdot u_c(SEC)}{\overline{SEC}}\times 100\%=7.9\% \quad (H.11)$$

附录 I

气体湿基与干基换算及再生气水分确定方法

I.1 湿基与干基换算

I.1.1 水蒸汽分压的确定

测量气体（如烟气、再生气）相对湿度、热力学温度和绝对压力，按式（I.1）计算水蒸汽分压：

$$P_{\mathrm{w}}=\frac{\varphi_{\mathrm{RH}}}{100}\times P_{\mathrm{sat}}(T) \qquad (\mathrm{I.1})$$

式中：

P_{w}——水蒸汽分压，kPa；

φ_{RH}——气体相对湿度，%RH；

$P_{\mathrm{sat}}(T)$——气体温度对应的饱和水蒸汽压力，kPa；

T——气体温度，T=273.15+θ，θ为气体摄氏温度，℃。

I.1.2 气体湿基流量与气体干基流量换算

气体湿基流量按式（I.2）换算为气体干基流量：

$$Q_{\mathrm{d}}=Q_{\mathrm{w}}\left(1-\frac{P_{\mathrm{w}}}{P}\right) \qquad (\mathrm{I.2})$$

式中：

Q_{d}——气体干基流量，$\mathrm{m^3/h}$；

Q_{w}——气体湿基流量，$\mathrm{m^3/h}$；

P——气体绝对压力，kPa。

I.1.3 湿基浓度与干基浓度换算

湿基浓度按式（I.3）换算为干基浓度：

$$C_{\mathrm{d}}=\frac{C_{\mathrm{w}}}{1-\frac{P_{\mathrm{w}}}{P}} \qquad (\mathrm{I.3})$$

式中：

C_{d}——气体干基浓度，%；

C_{w}——气体湿基浓度，%。

I.1.4 工况湿基流量与标准状态干基流量

工况湿基流量按式（I.4）换算为标准状态干基流量：

$$Q_{N,d}=Q_w\frac{P-P_w}{P_N}\frac{T_N}{T} \quad (I.4)$$

式中：

$Q_{N,d}$——标准状态干基体积流量，Nm^3/h；

P_N——标准状态压力，kPa；

T_N——标准状态热力学温度，K。

I.2 再生气未安装湿度计时的水分确定方法

再生气测量位置安装有湿度计，且经检定/校准/在线计量确认其计量性能满足测试要求时，以修正后相对湿度值代入（I.1）～（I.4）式进行湿基与干基换算。未安装湿度计时，再生气中的水蒸汽按测量位置温度下的饱和状态进行计算，即取此时再生气相对湿度φ_{RH}=100%RH，以该温度对应的饱和水蒸汽压力作为水蒸汽分压，代入（I.1）～（I.4）式进行湿基与干基换算。

附录 J

测试数据交叉核验方法

J.1 CO_2 物料质量守恒交叉核验

当吸收侧和再生侧均具备测量条件时，应选取不少于 12h 的同一稳定运行时段进行测量，并采用吸收侧捕集量与再生侧 CO_2 捕集量进行交叉核验。

J.1.1 吸收侧捕集量

吸收侧按照式（J.1）计算单位时间捕集量：

$$Q_{m,abs}=\varphi\times C_{in}\times Q_{in}\times\rho\times10^{-7} \quad (J.1)$$

式中：

$Q_{m,abs}$——吸收侧单位时间捕集量，t/h；

ρ——标准状态下 CO_2 密度（$\rho=\frac{44}{22.4}$），kg/m^3；

C_{in}——吸收塔入口烟气 CO_2 干基浓度，%；

Q_{in}——标准状态下吸收塔入口烟气干基流量，Nm^3 /h；

φ——CO_2 捕集率，%。

J.1.2 再生侧捕集量

再生侧按照式（J.2）计算单位时间捕集量：

$$Q_m=C_{pro}\times Q_{pro}\times\rho\times10^{-5} \quad (J.2)$$

式中：

Q_m——再生侧单位时间捕集量，t/h；

Q_{pro}——标准状态下再生塔出口再生气流量，Nm^3/h；

C_{pro}——再生塔出口再生气 CO_2 纯度，%。

两者相对偏差按式（J.3）计算：

$$\delta_m=\frac{2\times|Q_{m,abs}-Q_m|}{(Q_{m,abs}+Q_m)}\times100\% \quad (J.3)$$

式中：

δ_m——吸收侧单位时间捕集量与再生侧单位时间捕集量相对偏差，%。

J.2 核验记录

表 J.1　测试数据核验记录

核验项目	核验结果	相对偏差	核验结论	异常说明及处理
CO_2物料质量守恒交叉核验			□通过　□不通过	

核验项目均通过时，测试数据可用于最终测试结果计算。当两种测量结果的相对偏差超过 5%时，核验项目判定为不通过，应查明原因并重新计算或补充测试；无法查明原因或偏差仍超出合理范围的数据不得用于最终测试结果。