

《火电厂碳封存 CO₂ 检测方法》 国家标准征求意见稿编制说明

2024 年 12 月

一、工作简况

1.1 任务来源

为贯彻落实《中共中央国务院关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《关于加强碳捕集、利用和封存试验示范项目环境保护工作的通知》《关于加快建立统一规范的碳排放统计核算体系实施方案》《建立健全碳达峰碳中和标准计量体系实施方案》，进一步强化 CCUS 在重点行业节能减排和产业升级改造、实现“3060”目标中的支撑作用，促进形成绿色发展方式，推动经济高质量发展，更好指导火电行业 CCUS 中的 CO₂ 检测与计量，特制定本文件。

1.2 制定背景

生态环境部于 2016 年印发了《二氧化碳捕集、利用与封存环境风险评估技术指南（试行）》，整体规范和指导 CCUS 项目的环境风险评估工作，提出 CCUS 活动影响的地上和地下空间范围及注入前、注入中、场地关闭及关闭后的时间范围，均为可能造成碳封存环境风险的评估范围，工程施工、地质结构、CO₂ 注入参数、注入井参数、资源开采活动、机械材质等多种因素均为风险源，因此需对碳封存过程强化指导和标准建设。2018 年以来，《SY/T 6565-2018 石油天然气开发注二氧化碳安全规程》《SY/T 7440-2019 CO₂ 驱油田注入及采出系统设计规范》

等 CO₂ 地质利用与封存行业标准陆续出台，但碳捕集、输送和封存流程的国家标准和行业标准仍旧缺乏，未形成系统的标准体系。

2021 年 7 月 16 日，全国碳排放权交易市场正式启动上线交易，首个履约周期覆盖 2019-2020 年两个年度，共纳入发电行业重点排放单位 2162 家，覆盖约 45 亿吨 CO₂ 排放量。火电厂 CO₂ 封存与提高采收率技术和 CO₂ 咸水层封存与利用技术是目前产业化利用较为成熟、经济性相对较强的技术，可在实现 CO₂ 封存的同时有效补偿 CCUS 成本，将是近期发展的重点方向。若针未进行统一约束，不仅影响了碳资本的有效计量，同时存在令火电厂碳封存陷入大规模无序开发的潜在风险，势必对环境保护和生态安全将造成重大威胁。因此，有必要针对火电厂碳封存 CO₂ 检测方法，开展进一步的标准化研究。

面对严峻的碳减排压力，2013 年，国家发改委从 6 个方面公布了中国关于加快碳捕获、利用和封存的指导意见，并将推动相关标准规范的制定列入意见。结合我国 CCUS 工作的实际需要，需补充完善火电厂碳封存过程 CO₂ 检测方法相关标准内容，建立国家标准，可对 CCUS 全流程统一约束，以规范完善碳资本市场，为碳交易提供核算和统计数据，推动碳资本的有效、全方位计量，有效监管电力行业 CCUS 工程建设，助力顺利实现我国“3060”宏伟目标。为规范火电厂碳封存 CO₂ 检测指标，统一检测内容、方法和技术指标，确保检测结果的准确

性和可比性，制定本标准。

1.3 起草过程

2023 年 12 月 29 日，国家标准化管理委员会下达了本标准制定计划，计划号：20232498-T-424。

2024 年 1 月-6 月，组建标准起草组，讨论标准大纲，确定工作计划。。

2024 年 7 月-8 月，中国标准化研究院组织召开标准启动会。有关单位介绍了标准制定背景、技术进展、标准内容，成立了标准起草组，确定标准制定工作计划。

2024 年 8 月-12 月，起草组编制和完善了标准文本，形成标准征求意见稿，并同步更新编制说明。

二、国家标准编制原则、主要内容及其确定依据，修订国家标准时，还包括修订前后技术内容的对比

2.1 标准编制原则

（1）原则性原则

根据《中华人民共和国标准法》及其《实施细则》、GB/T 1.1-2020《标准化工作导则第 1 部分：标准的结构和编写》进行编制。

标准制定遵循“结合实际、准确测量、计算合理”的原则，与技术创新、试验验证、产业推进、应用推广相结合，统筹推进。并力求标准具有“简洁性、通用性、指导性、引导性和可扩展性”的特点。

（2）表达的通俗性

起草组在标准的编写过程中，反复通读全文，认真推敲每一句话，采用符合中文语法和语言习惯的表述方式，便于使用者理解。

（3）与其他标准相协调的原则

国外没有相应的国际标准和国外先进标准，只有相关的标准。本标准整体与国际相关的标准保持一致，具有一定延续性和创新性。具备条件时可申请国际标准。

与国家政策法规一致。符合《中华人民共和国环境保护法》《中华人民共和国大气污染防治法》《中华人民共和国土壤污染防治法》《中华人民共和国水污染防治法》等国家法律法规和管理办法的要求。

与强制性标准一致。符合《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）GB 15618-2018》《土壤环境质量 建设用地土壤污染风险管控标准（试行）GB 36600-2018》《环境空气质量标准 GB 3095-2012》《地表水环境质量标准 GB 3838-2002》等强制性国家标准的技术要求。

补充完善现有标准体系。目前尚无规范火电厂输送与封存 CO₂ 检测的国家标准，本标准制定也可填补碳达峰、碳中和标准体系中涉及 CCUS 碳检测相关标准空白。

2.2 标准主要内容及其确定依据

（1）范围

本标准规定了火电厂碳封存 CO₂ 检测方法的检测流程、检测方法
与要求、检测报告。

本标准适用于陆域范围内火电厂碳排放源经捕集处理后的CO₂
的管道运输、储层注入、地质空间CO₂封存等环节过程中的CO₂含量
检测方法，地质空间包含深部咸水层、枯竭油气藏、不可开采煤层等。
基性/超基性岩（矿化）等地质封存、CO₂驱油、CO₂驱气等地质利用
的CO₂检测方法可参考本标准。

（2）规范性引用文件

本标准的规范性引用文件包括：

GB/T 33672 大气二甲烷光腔衰荡光谱观测系统

GB/T 34415 大气二氧化碳(CO₂)光腔衰荡光谱观测系统

GBZ/T 300.37 工作场所空气有毒物质测定第 37 部分：一氧化碳
和二氧化碳（

GB/T 6682 分析实验室用水规格和试验方法

DZ/T 0064.1 地下水质分析方法 第 1 部分：一般要求

DZ/T 0064.2 地下水质分析方法 第 2 部分：水样的采集和保存

DZ/T 0064.47 地下水质分析方法 第 47 部分：游离二氧化碳的
测定 滴定法

DZ/T 0064.48 地下水质分析方法 第 48 部分：侵蚀性二氧化碳
的测定 滴定法

DZ/T 0064.49 地下水质分析方法 第 49 部分：碳酸根、重碳酸
根和氢氧根离子的测定 滴定法

HJ/T 166	土壤环境监测技术规范
HJ 494	水质采样技术指导
HJ 501	水质 总有机碳的测定 燃烧氧化—非分散红外吸收法
HJ 870	固定污染源废气 二氧化碳的测定 非分散红外吸收
SH/T 3202	二氧化碳输送管道工程设计标准
SY/T 6826	输油管道泄漏监测系统技术规范
SL 80	游离二氧化碳的测定（碱滴定法）
SL 81	侵蚀性二氧化碳的测定（酸滴定法）
ASTMD 513	水中二氧化碳溶解量和总量的标准试验方法

（3）术语的定义

1、管道泄漏 pipeline leak （来源：SY/T 6826-2022）

输送介质由于打孔、第三方破坏或管道破裂等原因从管道中流出。

2 、CO₂ 通量 carbon dioxide flux

CO₂ 通量是指生态系统通过某一生态断面的 CO₂ 的总量，通常用单位时间内通过单位面积的 CO₂ 的质量来表示。

3、CO₂ 浓度传感器 carbon dioxide concentration sensor

用于测量环境中 CO₂ 浓度的设备。它通过特定的检测原理和技术，将环境中 CO₂ 的含量转化为电信号或其他可读取的输出形式，以便检

测人员准确了解特定空间内 CO₂ 的浓度水平。

（4）检测流程

本文件规定了火电厂碳封存 CO₂ 检测方法的检测流程。

（5）检测方法与要求

本文件规定了火电厂碳封存 CO₂ 检测方法的检测对象、指标和方法。

检测方法包含以陆域范围内火电厂捕集的 CO₂ 为碳源, 包括碳封存区管道、井筒、地质体、地下水流体、地表土壤及大气在内的 CO₂ 检测方法。具体包括流量平衡检测法（见标准 5.2.1 章节）、非分散红外法（见标准 5.2.2 章节）、井口 CO₂ 泄漏通量检测法（见标准 5.2.3 章节）、U 型管流体采样检测法（见标准 5.2.4 章节）、红外传感器检测法（见标准 5.2.5 章节）、酸碱滴定 CO₂ 检测法（见标准 5.2.6 章节）、开放式动态累积室 CO₂ 检测法（见标准 5.2.7 章节）、光腔衰荡光谱法（见标准 5.2.8 章节）等。本文件规定了检测方法的具体内容, 包含检测方法的检测仪器、检测程序。

（6）检测报告

本文件规定了火电厂碳封存 CO₂ 检测方法的检测报告。

（7）附录部分

附录部分包括检测报告（见标准附录 A）。

2.3 修订前后技术内容的对比（如适用）

本标准为首次修订, 无修改内容

三、试验验证的分析、综述报告，技术经济论证，预期的经济效益、社会效益和生态效益

3.1 试验验证

3.1.1 管道 CO₂ 检测

试验组织：中国石油天然气管道工程有限公司。

参与单位：英国 Atmos 国际有限公司、相关国产设备厂商。

试验内容：为了全面地评价泄漏检测系统的性能，不同的管道运行工况将被设置来进行泄漏测试。基于流量划分，泄漏测试可检验设计流量下和最低流量下工况。基于温度划分，泄漏测试可检验夏季高温下和冬季低温下工况。基于管道所处状态划分，泄漏测试可检验稳态下和瞬态下工况。

表 1 Atmos SPRT 流量平衡法稳态泄漏测试工况

工况名称	输送流量	操作压力	操作温度	输送流体	漏点位置	模拟时长
工况 1	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第一个管段的中间	3 小时
工况 2	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第二个管段的大约三分之一处	3 小时
工况 3	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第三个管段的大约三分之二处	3 小时

工况 4	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第四个管段出口的一公里处	3 小时
工况 5	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第一个管段的中间	3 小时
工况 6	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第二个管段的大约三分之一处	3 小时
工况 7	最低输量 18000kg/h	X - YbargTBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第三个管段的大约三分之二处	3 小时
工况 8	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	冬季：入口 13°C，地温 13°C	超临界和密相二氧化碳	位于第四个管段出口的一公里处	3 小时
工况 9	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C，地温 38°C	超临界和密相二氧化碳	位于第一个管段的中间	3 小时
工况 10	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C，地温 38°C	超临界和密相二氧化碳	位于第二个管段的大约三分之一处	3 小时
工况 11	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C，地温 38°C	超临界和密相二氧化碳	位于第三个管段的大约三分之二处	3 小时

工况 12	设计输量 30000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 四个管 段出口 的一公 里处	3 小时
工况 13	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 一个管 段的中间	3 小时
工况 14	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 二个管 段的大 约三分 之一处	3 小时
工况 15	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 三个管 段的大 约三分 之二处	3 小时
工况 16	最低输量 18000kg/h	X-Ybarg (TBC)	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 四个管 段出口 的一公 里处	3 小时

表 2 Atmos SPRT 流量平衡法瞬态泄漏测试工况

工况名称	输送流量	操作压力	操作动作	操作温度	输送流体	漏点位置	模拟时长
工况 1	设计输量 30000 kg/h	X-Ybarg (TBC)	启输	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 二个管 段的大 约三分 之一处	3 小时
工况 2	设计输量 30000 kg/h	X-Ybarg (TBC)	停输	夏季：入口 58°C， 地温 38°C	超临界 和密相 二氧化碳 碳	位于第 二个管 段的大 约三分 之一处	3 小时

表 3 按照泄漏检测方法、选取检测单元数量、稳态测试工况数量、

每工况模拟时长、累计工况模拟时长等列表汇总如下：

表 3 稳态泄漏检测测试工况汇总

泄漏检测方法	选取检测单元数量	稳态测试工况数量	每工况模拟时长（小时）	累计工况模拟时长（小时）
Atmos SPRT 流量平衡法	1	16	3	48

表 4 按照泄漏检测方法、选取检测单元数量、瞬态测试工况数量、每工况模拟时长、累计工况模拟时长等列表汇总如下：

表 4 瞬态泄漏检测测试工况汇总

泄漏检测方法	选取检测单元数量	瞬态测试工况数量	每工况模拟时长（小时）	累计工况模拟时长（小时）
Atmos SPRT 流量平衡法	1	2 ^c	3	6

3.1.2 井筒 CO₂ 检测：

目前在 CO₂ 地质利用与封存项目的井底开展 CO₂ 浓度测试的试验验证工作还比较少，主要的试验验证工作多是在煤矿巷道、温室大棚等环境下开展的试验验证工作。张海庆（2015）研制了一种适用于煤矿巷道的红外 CO₂ 浓度传感器，该传感器主要由红外 CO₂ 传感元件、驱动电路、滤波/放大电路、温度和压力测量电路、微处理器及输出设备（红外遥控、显示、报警及通讯电路）等部分组成，并对该传感器进行了常态稳定性、温度稳定性测试及压力稳定性测试。首先对红外 CO₂ 传感器进行校准后，将传感器探头分别置于 CO₂ 浓度为 0.51%、1.51%、2.50%、4.50% 的标准气样中，各进行一周的常态稳定性测试。具体的测试数据见表 5。

表 5 常态稳定性测试 CO₂ 浓度实测值表

标准值 /%	第 1 天 /%	第 2 天 /%	第 3 天 /%	第 4 天 /%	第 5 天 /%	第 6 天 /%	第 7 天 /%
0.51	0.53	0.53	0.50	0.53	0.53	0.53	0.52
1.51	1.50	1.48	1.44	1.50	1.50	1.51	1.50
2.50	2.50	2.40	2.46	2.50	2.50	2.51	2.51
4.50	4.67	4.44	4.53	4.67	4.71	4.68	4.70

使用同一浓度的标准气体，分别进行温度及压力测试。实验选取 2.50%浓度的气样，温度范围从 0~40℃ 进行温度变化条件下的浓度测试，压力范围从 50~130 kPa 进行压力变化条件下的浓度测试，具体的测试数据分别见表 6、表 7。

表 6 不同温度下 CO₂ 浓度测试数据表

温度/℃	0	10	20	30	40
测量值/%	2.45	2.48	2.49	2.52	2.57

表 7 不同压力下 CO₂ 浓度测试数据表

压力/kPa	50	70	90	110	130
测量值/%	2.55	2.51	2.49	2.48	2.46

以上试验验证数据表明，该红外 CO₂ 浓度传感器工作稳定，检测数据具有很高的精度和可靠性。

王伟丽、林天瑜（2023）设计了一种基于红外吸收原理的便携自吸式 CO₂ 浓度检测仪，由主控板、OLED 显示屏、CO₂ 传感器、温湿度传感器、光照度传感器、真空自吸泵、锂电池、电源稳压模块、信号处理模块、声光报警模块、PWM 调速模块、外壳等构件组成。该检测仪不仅能检测 CO₂ 浓度，还可同时检测光照度和温湿度，具有

移动便携、成本低廉、易于使用、检测数据可实时保存并易于查阅等特点，适用于温室大棚、室内种植及养殖等场合的 CO₂ 浓度测定。该检测仪的主要技术指标如表 8 所示。在试验验证过程中，该检测仪可有效地检测温室大棚中 CO₂ 浓度的微小变化，开机连续运行 1000 h 未出现故障。

表 8 检测仪主要技术指标

参数	技术指标
CO ₂ 测量范围/ppm	0~10000
温度测量范围/°C	-40~85
湿度测量范围/%RH	0~100
光照度测量范围/lx	0~65535
供电电源	DC 12V/1A
外形尺寸/mm	150×100×72

3.1.3 地质体 CO₂ 检测

3.1.3.1 深部咸水层

U 型管采样检测法应用于多个二氧化碳咸水封存项目，包括 2004-2006 年美国 Frio 咸水封存示范项目、2007-2012 年澳大利亚 CO₂CRCOtway 咸水封存项目和 2009-2010 美国 Cranfield 咸水封存和驱油项目，2012 年美国 Citronelle Dome Anthropogenic 咸水封存项目等。美国德克萨斯州的 Frio 咸水封存示范项目，2004 年在十天内将 1600 吨 CO₂ 注入深度为 1.5 公里的 Frio 砂岩中。2006 年在同一地点进行的第二项实验包括将 350 吨 CO₂ 注入深度为 1.6 公里的砂岩中。Frio 试点重点关注了 CO₂ 对地下水文和地球化学的影响，是深部流体采样的典型案例。项目采用的 U 型管由一圈 3/8 英寸×0.049 英寸壁厚

的不锈钢管组成，在 1500 米深处的体积为 118L。四个 13L 高压不锈钢圆筒用于将采样流体储存在地面。U 型管控制线和其他仪器使用电缆保护器绑在油管上。为了隔离套管中的穿孔区间，在生产油管底部安装了一个气动封隔器，该封隔器带有用于容纳各种管线的装置。为了适应测井作业，封隔器被设置在顶部射孔区间上方 14.3 米处，封隔器底部和射孔顶部之间的套管段体积为 177 升。

该在注入前和注入后不同时间进行了多次采样，以 2004 年 10 月 4-7 日为例，在 52 小时内采集了 42 个水样，结果显示随着 CO₂ 羽流穿过监测井，地球化学条件发生了快速变化，图 1 显示了测量的 CO₂、O₂、Ar 和 CH₄ 的气体成分以及样品流体密度。最终，样品流从液体变为以超临界 CO₂ 为主，自升式 U 型管不再需要压缩 N₂ 来将样品驱动到地面。当系统自升时，样品缸（基于其已知体积和测量压力）用于量化从地面抽出的气体并估计气体从地层进入 U 型管的时间。示踪剂从注入井到 U 型管采样器的行程时间用于估计地层 CO₂ 饱和度。

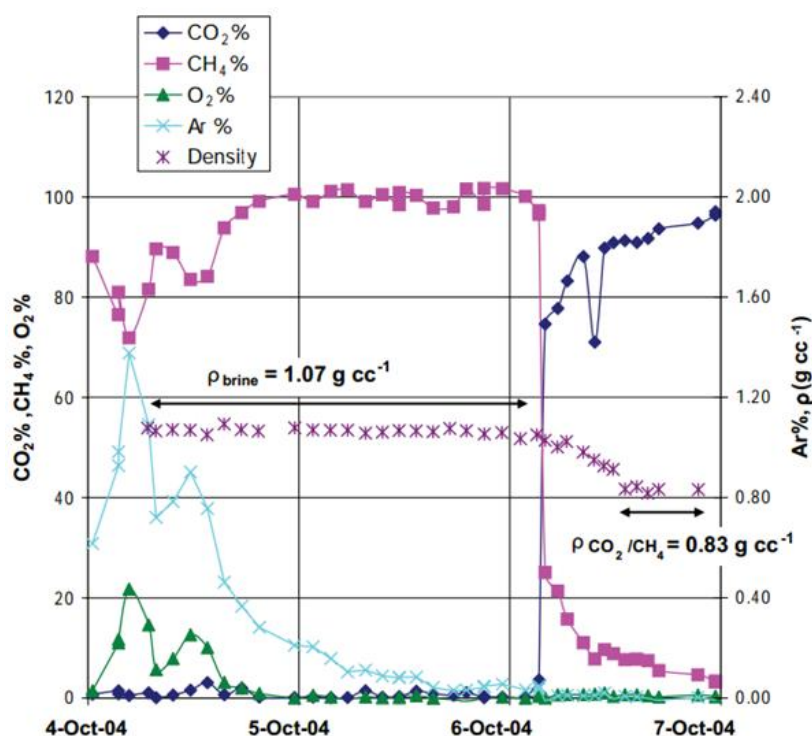


图 1 Frio 项目流体采样分析结果

3.1.3.2 枯竭油气藏

红外传感器通过检测气体分子对特定波长的红外辐射的吸收，来分析气体的浓度。由于 CO₂ 分子能够吸收特定波段（通常在 4.3 μm 和 15 μm）的红外辐射，因此红外传感器在检测 CO₂ 气体时具有高灵敏度和选择性。

1、在 CO₂ 注入至枯竭油气藏的过程中，主要目的是进行 CO₂ 封存。红外传感器能够提供以下信息：

（1）浓度检测：红外传感器能够检测 CO₂ 在注入井周围的分布情况，及时发现注入过程中可能的泄漏或非预期的区域分布。

（2）注入效果评估：通过对比注入前后的 CO₂ 浓度变化，可以评估 CO₂ 的注入效果，帮助优化注入策略。

（3）泄漏检测：在 CO₂ 注入过程中，可能会发生泄漏，红外传感器可以有效地检测潜在的泄漏点，减少环境污染风险。

2、尽管红外传感器在 CO₂ 监测中具有很好的应用前景，但在枯竭油气藏中的实际应用仍面临一些挑战：

（1）环境干扰：油气藏的环境中可能存在多种气体和颗粒物，可能会影响红外传感器的精度。需要对传感器进行校准和调整，以减少这些干扰。

（2）探测距离与传感器布局：由于油气藏的地下环境通常难以直接访问，因此需要合理布置传感器，并使用适当的信号处理技术来保证监测数据的准确性。

(3) 高压和高温环境：红外传感器的稳定性和寿命可能会受到高温、高压环境的影响，因此需要选择具有高耐受性的传感器材料。

3、红外传感器检测法相关研究与实践

(1) CO₂检测实验：一些研究通过在注入井周围布置多种传感器（包括红外传感器、温度传感器、压力传感器等），联合分析 CO₂ 的注入效果。例如，A. L. Goodman 等利用傅里叶变换红外光谱法对 CO₂浓度进行检测；邹雨等利用可见近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)波长内保留光谱吸收的特征对地层内气体进行检测；胡省三等在瓦斯监控技术方面采用了红外传感器检测法，同时可对 CO，O₂ 以及 CO₂ 浓度进行检测。

(2) 传感器网络与数据融合：为了提高监测精度，一些研究还提出了将红外传感器与其他类型的传感器（如声波传感器、光纤传感器等）结合，建立多传感器网络，并通过数据融合技术对 CO₂的扩散、流动及注入过程进行全面检测。

3.1.3.3 不可开采煤层

1、不可采煤层封存二氧化碳采样方法有两种：第一是单动双管取心技术、第二是保压取心技术；检测方法一般也是两种方法，第一是气象色谱法，第二是非分散红外法。检测过程是在实验室进行，检测成果可以平行检验，交叉验证；

2、采样方式验证

(1) 保压取心技术

在二十世纪 30 年代美国提出保压取心设想，1979 年投入商业服

务，当年取心 220 次，1980--1981 年取心 565 次，我国大庆油田 1980 年开展技术研究，1982 年投入使用，平均取心率 98.7%、保压率 80.2%、岩心密闭率 97%。



图 2 保压取心技术图（1. 打捞矛头；2. 锁定弹卡；3. 保温保压筒；4. 密闭阀；5. 非干扰取心管）

（2）单动双层岩心管取心技术

钻探单筒取心设备对于煤炭取样一直存在无法跨越的屏障，特别是煤层取心采取率无法突破 40% 的屏障，煤层瓦斯样品采集量太少的屏障。为了解决单管取心的问题，二十世纪八十年代初，借鉴国外的先进经验，研制了单动双层岩心管，1982 年 6 月，当时的地质矿产部颁布地质矿产行业标准，金刚石钻探单动双层岩心管结构形式和基本参数行业标准。开启了我国钻探取心的新篇章，彻底解决了煤层样品采集、瓦斯样品采集问题。2009 年 6 月成功在青海海拔 4000 米永冻层获取“陆地可燃冰”。

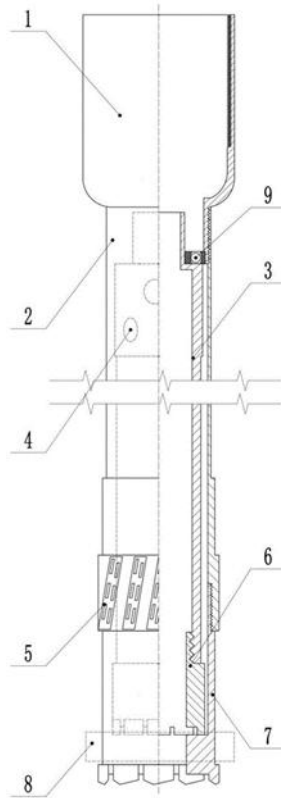


图3 单动双管取样器（附图标记：1 变扣接头、2 外岩心管、3 内岩心管、4 泄流孔、5 外管扶正器、6 内钻头、7 外钻头、8 泄流环、9 滚珠轴承。）

3.1.4 地下水 CO₂ 检测

1、酸碱滴定法

酸碱滴定法是一种经典的化学分析方法，广泛应用于各种化学分析实验中，其相关的国标主要规定了该方法的操作步骤、技术要求以及适用范围等。如 GB/T 12456-2008：该标准规定了使用酸碱滴定的指示剂法和电位滴定法测定食品中总酸的方法。其中，酸碱滴定法适用于果蔬制品、饮料、乳制品、酒、蜂产品、淀粉制品、谷物制品和调味品等食品中总酸的测定，但不适用于深色或浑浊度大的食品；GB 5009.34-2022 是《食品安全国家标准 食品中二氧化硫的测定》的

最新版本，其中第一法即为酸碱滴定法。该标准适用于食品中二氧化硫的测定，并扩大了原标准的适用范围。新标准还完善了样品的制备过程，新增了试验前处理，并规定了试样的采样量等具体要求；水利部发布的行业标准 SL 80-1994、SL 81-1994 规定了用碱滴定法测定水中游离、侵蚀性二氧化碳的方法，为水中游离二氧化碳的测定提供了规范的操作方法和技术要求；自然资源部发布的 DZ/T 0064.1-2021、DZ/T 0064.49-2021 等系列标准，规定了地下水水质分析的一般要求，该标准适用于地下水水质的各项分析工作，为地下水水质的准确测定提供了规范的操作方法和技术要求。

2、非分散红外法

非分散红外吸收分析是一种常用的气体分析方法，在多个领域都有广泛的应用，并且存在与之相关的国家或行业标准来规范其使用。如：GB/T 9801-1988：该标准规定了空气质量中一氧化碳的测定方法，即非分散红外法。它详细描述了该方法的原理、仪器要求、操作步骤以及分析结果的计算等。该标准适用于测定空气质量中的一氧化碳，测定范围为 0~62.5mg/m³，最低检出浓度为 0.3mg/m³。虽然直接针对非分散红外吸收分析的国标有限，但非分散红外气体分析仪（NDIR）在多个领域都有广泛的应用，因此相关的国家或行业标准可能涉及多个方面。例如，在环境监测、工业过程控制、食品安全等领域，都可能存在与非分散红外吸收分析相关的标准或规范。

3.1.5 土壤 CO₂ 检测

1、科研观测平台评价验证

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心建成青海平安天然CO₂野外科研观测基地，集成创新了二氧化碳地质封存环境的影响评价、检测方法和监测技术。通过野外观测与试验，明晰了高浓度二氧化碳泄漏对土壤环境的影响机理，研发了浅地表-地表二氧化碳泄漏实时动态检测技术，并应用于延长油田、胜利油田二氧化碳驱油与封存示范工程，以及中联煤山西沁水二氧化碳驱煤层气与封存示范工程，为工程实施兼顾生态保护提供了安全保障。

2、封存工程监测实践验证

中国地质调查局水文地质环境地质调查中心与国家能源集团合作共建鄂尔多斯 CCS 示范工程（神华 CCS 示范工程），是我国首个 30 万吨级深部咸水层二氧化碳地质封存示范工程，实践了二氧化碳地质封存全流程工程技术。通过分析二氧化碳地质封存对人群健康、土壤环境、水环境等环境要素可能造成的环境影响，以及地面变形与诱发地震等安全风险，初步建立了二氧化碳地质封存环境影响与安全风险评价方法及指标体系。自 2010 年以来，运用多种检测技术手段，持续开展“大气-地表-地下”环境影响监测，包括大气二氧化碳浓度、土壤二氧化碳通量、井下地下水环境多参数自动监测，以及二氧化碳羽流运移监测等技术监测，可以开展多个监测要素的验证与实践。

3.1.6 大气 CO₂ 检测

1、非分散红外（NDIR）方法测量二氧化碳（CO₂）浓度的研究内容：

（1）德国联邦物理技术研究院（PTB）

研究内容:PTB 在 NDIR 技术的标准化和校准方面进行深入研究,主要目标是提高 CO₂测量的精度和一致性。PTB 开发了高精度 NDIR 传感器,并研究如何在极端温湿度条件下补偿 NDIR 测量中的误差,以便其设备在工业和环境监测中的稳定性和准确性得到保障。

(2) 美国国家标准与技术研究院 (NIST)

研究内容: NIST 通过 NDIR 技术标准化研究,确保工业和环境中的 CO₂检测的一致性。NIST 建立了多种 CO₂标准气体的校准程序,开发了一系列用于 NDIR 设备的测试标准,重点在于校准精度的提升和传感器的长期稳定性。此外, NIST 还对 NDIR 传感器在不同应用场景(如工业烟气监测、室内空气质量控制)下的适应性进行了研究。

(3) 日本产业技术综合研究所 (AIST)

研究内容: AIST 在 NDIR 技术的改进方面投入大量精力,主要涉及 CO₂检测在工业和医疗领域的应用。AIST 专注于 NDIR 传感器的响应时间优化和小型化设计,使得 NDIR 设备在短时间内准确检测快速变化的 CO₂浓度,满足环境监测和医疗应用的需求。

(4) 中国计量科学研究院 (NIM)

研究内容: NIM 在 NDIR CO₂检测的计量标准制定和传感器校准方面进行深入研究。NIM 开发了用于环境监测的高精度 NDIR CO₂传感器,并致力于与国际标准接轨,确保中国市场上 NDIR 设备的数据溯源和测量一致性。NIM 还参与了制定适用于工业应用的多点校准流程,以确保 NDIR 设备的线性范围和数据精确性。

(5) 清华大学

研究内容：清华大学环境科学与工程学院的研究团队利用 NDIR 技术对大气和室内空气中 CO₂进行长期监测，开发了高灵敏度 NDIR 传感器，适用于从低浓度环境监测到高浓度工业废气监测等多种应用。研究重点在于提高传感器在不同温湿度条件下的精度和响应速度。

（6）麻省理工学院（MIT）

研究内容：MIT 在环境监测和工业控制领域中采用 NDIR 技术检测 CO₂。研究团队开发了一种便携式 NDIR 设备，能够在恶劣环境下保持稳定检测，通过快速响应系统捕捉工业场所 CO₂浓度的动态变化，为大气污染研究提供了高精度数据支持。

（7）英国国家物理实验室（NPL）

研究内容：NPL 在 NDIR 传感器的温度补偿和压力校准方面进行了大量研究，尤其是应用于环境监测站中的长期 CO₂浓度监测。NPL 致力于 NDIR 技术在大气环境中的标准化应用，确保设备在不同地区和气候条件下的精确性和可靠性。

（8）中科院生态环境研究中心

研究内容：中科院生态环境研究中心的研究团队采用 NDIR 传感器进行大气 CO₂监测，特别关注自然生态系统中二氧化碳的季节性变化。该中心利用 NDIR 技术监测森林和湿地等生态系统的 CO₂浓度变化，为气候变化研究提供了基础数据。

这些研究机构在 NDIR CO₂检测领域的具体研究内容展示了从标准化制定到技术优化的多样化应用，为全球 CO₂监测提供了科学支持和数据可靠性。

2、光腔衰荡法（CRDS , Cavity Ring-Down Spectroscopy）检测二氧化碳的研究内容：

（1）美国国家海洋和大气管理局（NOAA）

研究内容：NOAA 利用光腔衰荡法在全球范围内监测大气中的 CO₂ 浓度，作为其全球温室气体监测网络的一部分。NOAA 在不同高度和纬度的站点安装了 CRDS 设备，跟踪大气中 CO₂ 的浓度变化，特别是用于追踪温室气体排放的长期变化和季节性波动，为气候变化模型提供高精度的数据。

（2）德国马克斯·普朗克生物地球化学研究所

研究内容：该研究所利用 CRDS 法测量生态系统的 CO₂ 吸收和排放情况，研究植物和土壤的碳循环过程。CRDS 技术在该所的应用帮助精确测量生态系统对温室气体的动态响应，特别是在土壤和植被之间的 CO₂ 通量测量方面。

（3）日本国立环境研究所（NIES）

研究内容：NIES 采用光腔衰荡法在其大气监测站点进行长期的 CO₂ 浓度监测，研究气候变化背景下 CO₂ 的季节性和年际变化。NIES 使用 CRDS 法的高精度测量能力，确保数据在极端天气条件下的准确性，并为日本的温室气体排放研究提供了长期数据。

（4）美国哈佛大学大气科学中心

研究内容：哈佛大学利用 CRDS 技术监测北美地区的 CO₂ 浓度，重点研究城市和自然生态系统的温室气体排放与吸收平衡。该团队的研究为城市区域的碳排放模型提供了高分辨率的数据，帮助预测城市

扩张对大气 CO₂的影响。

(5) 中国科学院大气物理研究所

研究内容：中科院大气物理研究所利用 CRDS 法监测中国大陆的 CO₂排放与吸收模式，尤其在城市和农业区域中，测量不同季节的 CO₂浓度变化。该研究所的 CRDS 系统布置在长期监测站点，用于分析气候条件变化下 CO₂浓度的长期趋势。

(6) 英国国家物理实验室 (NPL)

研究内容：NPL 研究团队利用 CRDS 技术进行 CO₂和甲烷等温室气体的监测，主要集中于提高 CRDS 测量的校准精度和稳定性。NPL 与其他国际研究机构合作，确保测量数据的一致性，为英国和欧洲温室气体减排政策提供技术支持。

(7) 加州大学伯克利分校 (UC Berkeley)

研究内容：UC Berkeley 的研究团队使用光腔衰荡法监测气候变化研究中的温室气体，特别是在北美野外站点对 CO₂进行高精度监测，以获取气候模型所需的关键数据。这些研究帮助揭示了生态系统和气候变化之间的相互作用。

这些研究团队通过光腔衰荡法提高了 CO₂浓度测量的精确度和灵敏度，为全球气候变化、碳循环和温室气体排放控制提供了重要数据支撑。

3.2 综述报告

3.2.1 管道 CO₂ 检测

国内外油气化工管道的泄漏监测技术经过多年发展和应用，已经很成熟，并且呈现出多样化趋势，新技术不断涌现。与此同时，用户对泄漏监测的需求也在不断提高。其主要需求可概括为如下三点：

- （1）准确可靠地诊断泄漏故障位置；
- （2）迅速可靠地报告泄漏程度；
- （3）泄漏诊断技术系统原理简单、维护和操作方便。

国内外根据检测对象的不同，管道检漏方法大致分为两种：直接检漏方法：直接检测泄漏的石油、气体等的方法；间接检漏方法：检测因泄漏造成的流量、压力、声音等物理状态发生变化的检漏方法。直接检漏方法包括电缆阻抗检测法、特性阻抗变化法、光纤法、特性阻抗变化法、LASP 空气取样法、充气压力带法、导电高聚物法、油溶性压力管法、气体检测法（半导体式、催化燃烧式）、机载红外线法、热红外成像法等。直接检漏法局限性在于有的方法不适用已建管道系统、成本高、维护费用高，因为需要在管道建设时沿管道铺设线缆，如电缆阻抗检测法，特性阻抗变化法，光纤法等，有的方法只适用于局部点位检测，如气体检测法，有的方法只适用于大泄漏，如机载红外线法，热红外成像法。

间接检漏方法主要包括负压波法、声波法、质量(或体积)平衡法、实时瞬态模型法、压力点分析法、神经网络法、统计分析法等。与直接检漏方法相比，间接检漏方法具有系统稳定可靠、监测范围广、使用寿命长、建设成本及维护费用低的优点。本标准推荐采用间接泄漏检测方法。

行业标准《输油管道泄漏监测系统技术规范》（SY/T6826-2022）中，第 4.4 条中输油管道泄漏监测系统应采用先进、可靠的技术，宜采用具有互补性的技术，如压力波结合流量平衡法的管道泄漏监测技术。

国外对于管道泄漏没用明确的标准需求，完全看双方的业务需求和商务需求确定。以下列举了 4 个国际二氧化碳泄漏检测项目。包含项目概况、解决方案、项目状态、遵循标准、参与企业等内容。可以帮助读者更为直观的了解目前全世界二氧化碳泄漏检测项目的现状和发展趋势。

（1）澳大利亚桑托斯有限公司 54 公里二氧化碳注入管道

管道所有者：澳大利亚桑托斯有限公司。

泄漏检测系统供应商：英国 Atmos 国际有限公司。

管道建设阶段：管道正在建设中。

管道背景信息：西澳大利亚桑托斯有限公司从 Moomba 天然气处理厂厂捕获二氧化碳，并通过一条约 54 公里长的管道将其输送到 Cooper 盆地的 Della、Marabooka 和 Strzelecki 气田的枯竭气藏中进行永久储存。

Atmosi 的解决方案：Atmosi 提供了 Atmos Pipe 泄漏检测系统。

Atmos Pipe 使用校正后的流量平衡与强大的顺序概率比测试（SPRT）统计技术相结合，提供高泄漏灵敏度，同时保持低水平的误报警。

（2）阿联酋阿布扎比 ADNOC BAB 油田 54 公里二氧化碳管道

管道所有者：阿联酋阿布扎比 ADNOC 公司。

泄漏检测系统供应商：英国 Atmos 国际有限公司。

管道建设阶段：管道正在建设中。

管道背景信息：Bab 油田位于阿布扎比市西南约 160 公里的沙漠地带。该 ADNOC 公司二氧化碳管道为 54 公里，从 BAB 油田远东北区和 BAB 油田 SIMGAP 地区到 Bu Hasa SWAG 处理厂。

Atmosi 的解决方案：

Atmos Wave 泄漏检测系统是结合了负压波原理，声波原理以及 3D 图形处理原理于一体的泄漏检测系统，并完美符合美国石油协会（API）颁布的 API1130 文件对泄漏检测系统的要求。在系统中，集合了多种复杂的数学、物理算法，保证了系统的先进性与可靠性。

Atmos Wave 已在多条运营管道上进行了严格测试，取得了极大的成功。大量的性能评估和现场测试证实 Atmos Wave 能够有效区分泄漏/偷盗油事件和正常管道操作，且误报警率极低。在国际管道研究协会组织的某条原油管道的测试中，与国际上其他同类产品相比，Atmos Wave 检测到更多的泄漏，同时误报警次数为 0。

（3）阿联酋阿布扎比 ADNOC BAB 油田 54 公里二氧化碳管道
管道所有者：加拿大壳牌公司。

泄漏检测系统供应商：英国 Atmos 国际有限公司。

管道建设阶段：管道已投产。

管道背景信息：加拿大壳牌有限公司从壳牌 Scotford Upgrader 捕捉二氧化碳，并通过一条约 64 公里长的管道将其输送到位于加拿大阿尔伯塔省的 Fort Saskatchewan，并在地下 2 公里左右进行封存。

Atmosi 的解决方案：

Atmosi 提供了 Atmos Pipe 泄漏检测系统。Atmos Pipe 使用校正后的流量平衡与强大的顺序概率比测试（SPRT）统计技术相结合，提供高泄漏灵敏度，同时保持低水平的误报警。

（4）澳大利亚戈尔贡气田 7 公里二氧化碳注入管道

管道所有者：埃克森美孚、雪佛龙和壳牌石油公司。

泄漏检测系统供应商：德国 KROHNE。

管道建设阶段：管道已投产。

管道背景信息：西澳大利亚戈尔贡气田的天然气含有约 14% 的天然二氧化碳。在将天然气冷却至 -162°C 转化为液化天然气之前，需要去除二氧化碳。为了最大限度地减少环境影响，分离出的二氧化碳不会排放到大气中，而是被注入储存地层。一条长达 7 公里的地下管道将二氧化碳从液化天然气工厂输送到二氧化碳注入井。

KROHNE 的解决方案：

KROHNE 提供了他们的 PipePatrol E-RTTM 泄漏检测系统。基于管道入口和出口处的流量、压力和温度测量以及管道的数字孪生模型，PipePatrol 使用实时瞬态模拟技术计算出管道任何位置的流量、压力和温度。如果计算的流量、压力和温度开始偏离实际测量值，将使用一种专有算法来区分传感器漂移和真实泄漏，以避免误报警情。该项目涉及到一些独特的条件，例如，超临界相二氧化碳的特定热物理性质以及由孔板进行的流量测量的可调范围有限。尽管如此，该项目中的最小可检测泄漏率约为 1%，检测时间少于 15 分钟。

3.2.2 井筒检测:

目前在井底 CO₂浓度测试和井口 CO₂通量测试方面,国际上和国内尚未有专门针对 CO₂地质利用与封存情境下井底和井口环境的测试标准,但在环境监测、煤炭开采等领域,有部分标准可提供一定的方法借鉴。中华人民共和国国家计量检定规程《一氧化碳、二氧化碳红外气体分析器》(JJG 635—2011)详细规定了测定 CO₂浓度的 CO₂红外气体分析器的首次检定、后续检定和使用中检验的流程,包括检定环境条件、检定用设备、检定项目、检定方法等内容。中华人民共和国国家生态环境标准《固定污染源废气 气态污染物(SO₂、NO、NO₂、CO、CO₂)的测定 便携式傅立叶变换红外光谱法》(HJ 1240—2021)详细规定了在常温常压环境下测定废气中 CO₂浓度的干扰源与干扰消除方法、所需试剂和材料、仪器和设备、样品采集分析步骤、结果计算等内容。应急管理部规章《煤矿安全规程》规定了矿井中 CO₂浓度的限定值。当矿井总回风巷或者一翼回风巷中 CO₂浓度超过 0.75%时,必须立即查明原因,进行处理。当采区回风巷、采掘工作面回风巷风流中 CO₂浓度超过 1.5%时,必须停止工作,撤出人员,采取措施,进行处理。中华人民共和国安全生产行业标准《矿用二氧化碳传感器通用技术条件》(AQ 1052—2008)规范了矿山井下使用的 CO₂传感器的技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、使用说明书、运输和贮存等方面的要求。该标准适用于矿山井下有可燃气体爆炸环境的 CO₂传感器,为确保矿山井下 CO₂传感器的安全性和可靠性提供了可遵循的权威依据。值得注意的是,由于井底环境

特殊，压力、温度等条件与常规环境有很大差异，常规的采样设备与采样步骤可能会引入误差，影响测试结果的准确性。目前的标准中缺乏针对井底特殊环境下的 CO₂ 浓度测试的详细规范，包括采样设备的选择、采样位置的确定、样品的保存与运输等方面均缺乏依据，需要进一步完善相关标准。

3.2.3 地质体 CO₂ 检测

3.2.3.1 深部咸水层

U 形管采样技术是由美国劳伦斯伯克力试验室于 2004 年研发成功，在美国和澳大利亚多个咸水封存项目中应用，最大取样深度达到 2000m。2018 年主要研发人员 Barry M. Freifeld 申请专利《Device useful as a borehole fluid sampler》。我国地质调查局水环中心和中科院武汉岩土所也对该技术进行了研发，并进行了现场测试和申请了相关专利。

3.2.3.2 枯竭油气藏

为保证 CO₂ 检测过程中仪器精度的准确性，国际标准化组织(ISO)和各国标准化机构针对环境监测、气体检测以及 CO₂注入监测的技术要求提出了相应的标准。ISO 17025 作为气体检测领域的通用标准，对检测仪器的准确性做出了严格要求，以确保 CO₂ 检测过程中仪器精度。国内在红外法测定 CO₂ 浓度方面也制定了 HJ870-2017《固定污染源废气二氧化碳的测定非分散红外吸收法》等相关标准，其中 GB/T 16157《固定污染源排气中颗粒物测定和气态污染物采样方法》中详细介绍了红外法测定 CO₂ 浓度过程中仪器气密性的检查方法。对于气

体浓度或丰度的计算, Vienna Pee Dee Belemnite, VPDB 标准给出了普适性较强的公式。

3.2.3.3 不可开采煤层

目前采用的取样方法, 无论保压取心还是单动双管取心, 都是经过数以百万次取心检验的方法, 为了加速取样时间, 将绳索取心技术应用到瓦斯样品采取过程中。检测方法也是非常成熟的实验室检测技术。

3.2.4 地下水 CO₂ 检测

1、酸碱滴定法

酸碱滴定法是一种简单、实用的 CO₂ 化学分析方法, 具有准确性高、适用性广等优点, 适用于各种含 CO₂ 的溶液或气体样品的检测, 具有广泛的应用范围, 其原理是基于酸碱中和反应的化学平衡原理。通过向待测溶液中加入已知浓度的酸或碱溶液, 并借助指示剂颜色的变化来判断滴定终点, 从而计算出待测溶液中某种组分 (如 CO₂) 的含量。在 CO₂ 检测中, 酸碱滴定法主要利用 CO₂ 与碱反应的特性, 通过测量消耗的碱量来推算 CO₂ 的含量。在滴定过程中, 使用指示剂来观察滴定终点, 即酸碱反应达到完全中和的时刻。本方法的准确性受到多种因素的影响, 如指示剂的选择、滴定液的浓度、滴定过程中的搅拌程度等。本方法测试时需要较长的滴定时间和较高的操作技能, 不适合快速检测或自动化检测。

2、非分散红外法

非分散红外 (Non-dispersion infrared, NDIR) 又称非分散红外吸

收分析（NDIR），是一种基于红外吸收光谱分析原理的检测技术。该方法利用 CO₂ 分子对特定波长的红外光具有强烈的吸收特性。当红外光通过含有 CO₂ 的气体时，CO₂ 分子会吸收特定波长的红外光，导致光强减弱。通过比较测量气室和参比气室中红外光的强度差异，产生与 CO₂ 浓度成正比的电信号，从而测定 CO₂ 的浓度。本方法稳定性好、响应速度快、测量范围宽等优点，在 CO₂ 检测领域得到了广泛应用。随着科技的进步，非分散红外法 CO₂ 检测技术也在不断发展。目前，国内基于非分光红外原理的 CO₂ 浓度测量仪的测量范围为体积分数的 3%~30%（30000 ppm~300000 ppm），适用于多种应用场景。然而，对于 0~5000 ppm 浓度范围的测量技术，目前尚未有专门研究，如何进一步提高测量的准确性和稳定性，降低成本，也是未来非分散红外法 CO₂ 检测技术需要解决的问题。

3.2.5 土壤 CO₂ 检测

目前，中国已开展碳捕集、利用与封存项目 23 个，并陆续开展部署了“地下-地表-大气”环境风险检测、监测工作，在结合实际封存场地安全监测基础上，全球范围内计 14 处现场尺度的人工释放 CO₂ 实验场地开展原位观测与类比研究。尽管现有封存商业或示范工程对地质封存 CO₂ 泄漏风险及监测高度重视，但缺乏专业的技术标准或政策指导性文件指导，如在基础方法、技术推广、项目建设与管理、检测、监测、风险管理等多个环节尚无相关标准可以遵循，严重影响了 CCUS 技术的推广应用。基于此，迫切需要深入开展火电厂等碳封存工程检测、监测评价与安全管理规范等领域制定研究。

表 9 国内外从事相关研究的主要机构

序号	机构名称	相关研究内容	相关研究成果	成果应用情况
1	澳大利亚地球科学局 (GA)	开展了 CO ₂ 地质封存、温室气体监测和核查、提供技术咨询以及推广和教育等方面研究工作	澳大利亚沉积盆地二氧化碳封存潜力数据、CO ₂ 检测和 CO ₂ 迁移或泄漏的量化工具与技术	确定澳大利亚剩余油区 (ROZ) 的碳氢化合物和 CO ₂ 封存潜力; 评估 CO ₂ 地质封存的监测技术, 并收集选定陆上地区的区域大气和地下水基线数据。
2	日本 JCCS 公司	苦小牧 CCS 项目是日本首个离岸 CCS 综合产业示范项目, 也是迄今为止亚洲最成功的海底封存项目, 主要开展演示和验证集成 CCS 全链系统的可能性, 包括从制氢废气中 CO ₂ 捕获、压缩、注入、封存、泄漏、检测、监测等多环节研究工作。	基于对项目执行、场地监测内容及布点、监测设施及技术等, 开展了全链条有益探索, 制定了贯穿 CO ₂ 封存过程全生命周期的一套监测方案, 构建了空气—海水—海底—注入层位—深部结构。	苦小牧 CCS 示范项目运用为中国离岸 CO ₂ 封存的开展提供了参考经验和技术示范 (2022 年中国首个 CO ₂ 海底地质封存示范工程启动)。
3	中国地质调查局水文地质环境地质调查中心	与国家能源集团 (神华煤制油) 合作共建中国第一个煤基全流程深部咸水层二氧化碳地质封存示范项目; 组织实施了中国第一次二氧化碳驱水封存先导性试验; 开展了系列的检测、监测与环境影响评价技术方法和设备研发。	构建了立体监测技术方法体系; 形成了环境影响与安全风险评估方法; 集成了 CO ₂ 环境影响监测技术与设备。	相关技术、设备等在神华 CCS 示范工程、胜利油田、延长油田等地广泛应用; 支撑支撑管理部门政策制定, 参与环境保护部主导的我国首个《二氧化碳捕集、利用和封存环境风险评估技术指南 (试行)》编制。

3.2.6 大气 CO₂ 检测

1、非分散红外法

固定污染源排气中氮氧化物非分散红外吸收分析方法是污染源在线监测方法的一种，目前也普遍应用于便携式现场监测仪。通过查阅相关文献，国际化标准组织、DIN 德国标准化学会以及美国 EPA 制定了相关的标准或法规，见表 10。由于我国与国外存在不同的环境差异，不可能完全照搬国外的相关方法标准，本标准是建立在对国外此类方法标准参考的基础上建立起来的，更加符合我国固定源排气测定的相关条件。

目前氮氧化物非分散红外吸收分析方法在国外已经得到了较为广泛的应用，日本富士（FUJI）红外线分析仪采用非分散型红外线吸收法测定 NO_x 、 SO_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 ，其采用单光束式，可进行自动校正、上下限浓度报警以及远程量程切换等，几乎不受水分的干涉影响。日本岛津（SHIMADZU）NSA-3080 气体分析仪采用非分散红外吸收分析方法，在国内部分污染源的在线监测系统中也得到较为广泛的应用。

表 10 国外相关分析方法标准或法规

国家、地区或组织	法规、标准或方法名称	法规、标准或方法编号	适用范围	主要内容
国家标准化组织（ISO）	固定源排放氮氧化物质量浓度的测定自动监测系统工作特性	ISO10849-1996	燃煤、燃油垃圾焚烧等烟气中氮氧化物的测定	非分散红外法是自动测量方法的其中一种，规定了气体分析仪的检出限、方法原理、干扰物质的影响、仪器性能指标等内容。
德国	固定源排放氮氧化物测定氮氧化	DINEN14792-200		

	物 (NO<(Index)x>) 的 质量浓度. 参照法	6		
美国 EPA	固定源排放 氮氧 化物的 测定	方法 7E		

2、光腔衰荡光谱法

目前国内外关于光腔衰荡光谱（CRDS）法的二氧化碳（CO₂）测量测试标准：

（1）ISO 23466:2020 - Determination of greenhouse gases (GHG) in ambient air -- Specification of requirements for greenhouse gas analyzers based on CRDS

内容概述：国际标准化组织（ISO）制定的此标准规定了使用 CRDS 法测量环境空气中温室气体（包括 CO₂）的技术要求。它涵盖了设备的灵敏度、测量精度、校准方法以及数据处理要求，适用于实验室和野外测量。

应用场景：大气监测、环境科学和温室气体研究。

（ 2 ） EPA GHG Measurement Guidelines - United States Environmental Protection Agency (EPA)

内容概述：美国环保署（EPA）提供了一套温室气体测量的指导，包括使用 CRDS 法测量 CO₂和其他温室气体的技术细节。该指南为设备校准、质量控制、数据验证等提供了具体步骤，确保数据的一致性和精确性。

应用场景：工业排放、环境监测和温室气体数据报告。

(3) ASTM D6348-03 (2012) - Standard Test Method for Determination of Gaseous Compounds by Extractive Direct Interface Fourier Transform Infrared (FTIR) Spectroscopy

内容概述：虽然主要针对 FTIR 方法，但 ASTM D6348-03 也涉及了 CRDS 法的测试技术要求。该标准包含了对光腔衰荡设备的校准、准确性验证以及气体浓度测量方法。

应用场景：工业烟气和环境空气中的气体监测。

(4) WMO GAW Report No. 227 - Guidelines for the Measurement of Methane and Nitrous Oxide and their Quality Assurance*

内容概述：该世界气象组织（WMO）全球大气监测（GAW）指南详细介绍了 CRDS 技术用于温室气体（包括 CO₂）监测的技术要求。报告中包含了 CRDS 设备的校准流程、长期监测的质量保证要求和数据处理建议。

应用场景：全球温室气体监测网络的高精度测量。

(5) ISO 20988:2007 - Guidelines for assessing the uncertainty of measurement of emissions of gaseous pollutants

内容概述：ISO 20988 提供了气体污染物测量不确定性评估的指南，包括 CRDS 技术在测量中的应用。该标准有助于在使用 CRDS 法测量 CO₂ 时进行不确定性分析，以确保数据的准确性和可靠性。

应用场景：适用于工业排放和环境监测的质量控制。

这些标准为使用 CRDS 法测量二氧化碳提供了详细的技术规范，包括设备校准、数据准确性、环境适应性和不确定性分析等，为全球大气和工业领域的温室气体监测提供了科学支持。

3.3 技术经济论证

本标准的制定，填补火电厂碳封存 CO₂ 检测方法方面的空白，方法的建立对于碳封存项目质量与安全保障将起到重要作用。直接经济效益是在 CO₂ 泄漏时，第一时间发现，减少 CO₂ 泄漏量，降低经济损失；间接经济效益是该标准推荐的检测方法对于生产稳定运行起到不可或缺的保障作用。

标准制定过程中从检测方法的流程、仪器、检测步骤进行了充分的研究，使本标准具有科学性和技术经济可行性。

3.4 预期效益

（1）经济效益

节能减排和低碳生活在全球范围内正在迎来快速发展，中国正在积极推进在碳捕集和碳封存产业链的布局。本标准的制定，填补国内火电厂碳封存 CO₂ 检测方法方面的空白，方法的建立对于碳封存项目质量与安全保障将起到重要作用。规范火电厂 CCUS 全流程的 CO₂ 检测指标、方法和具体流程，强化碳资本的有效计量。

（2）社会效益

低碳是未来国家环境生态体系的重要组成部分。建立二氧化碳检

测国家标准，是立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局，落实《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》、《2030 年前碳达峰行动方案》以及《科技支撑碳达峰碳中和实施方案（2022—2030 年）》的部署要求，推动 CCUS 国家标准体系建立。本标准制定完成后，可规范火电厂碳封存 CO₂ 检测方法，提高检测质量，减少安全风险，便于环境、生态相关部门履行监管职能。结合我国 CCUS 工作的实际需要，补充完善火电厂碳封存相关 CO₂ 检测方法标准内容，以规范完善碳资本市场，助力我国 3060 目标顺利实现。

（3）生态效益

当前，大气 CO₂ 浓度剧增，温室气体的剧增导致了全球气候变暖趋势的加剧和极端气候的频发。碳捕集利用与封存（CCUS）技术可以改善全球气候变化，并且被公认为是最终实现 CO₂ 净零排放的主要途径之一，是目前实现化石能源低碳化的唯一选择。建立火电厂碳封存 CO₂ 检测方法的国家标准，可以充分 CCUS 技术，推动国家碳封存行业和领域发展，便于国家对环境的检测与监管，保障环境和生态安全。

四、与国际、国外同类标准技术内容的对比情况，或者与测试的国外样品、样机的有关数据对比情况

国际尚无专门针对 CCUS 示范项目火电厂碳封存 CO₂ 检测的相关标准。本标准整体与国际一些相关标准保持一致，具有一定延续性

和创新性。具备条件时可申请国际标准。

五、以国际标准为基础的起草情况，以及是否合规引用或者采用国际国外标准，并说明未采用国际标准的原因

本标准不涉及采标。

六、与有关法律、行政法规及相关标准的关系

本标准编制过程遵循了现行的国家《标准化法》。本标准与现行法律、法规及相关标准协调一致。

七、重大分歧意见的处理经过和依据

本标准遵循了各方参与原则，制定时充分吸收了相关领域专家的意见和建议，无重大分歧。

八、涉及专利的有关说明

本标准不涉及专利。（如涉及专利要说明专利权问题）

九、实施国家标准的要求，以及组织措施、技术措施、过渡期和实施日期的建议等措施建议

本标准建议自发布起 3 个月实施，标准实施后，CO₂地质封存研究机构、CO₂管道输送、碳核查、碳交易等单位依据本标准，及时组织人员培训，按照本标准提出的技术性能要求贯彻落实，严格认真遵守本标准规定。

十、其他应当说明的事项。

无。