

# 碳捕集、 利用与封存

电子书

**VAISALA**



# 碳捕集——应对气候变化的重要工具？

碳捕集有两个主要目标：减少工业排放到大气中的二氧化碳，解决已经积累的二氧化碳问题。二氧化碳是主要的温室气体，因此也是全球气候危机的焦点。人类活动排放的温室气体加剧了大气层的自然温室效应，导致全球气温上升。

几乎所有工业活动都会产生二氧化碳排放，导致气候模式、粮食生产、海平面等发生不可逆转的变化。

多年来，测量捕集的碳量（直接来自空气、工业和社区排放以及商品制造过程）的技术已经取得了长足的发展。近期的进展进一步提高了它们的准确性和可靠性，使它们成为我们应对全球气候变化越来越有效的工具。

碳捕集概念看似新颖，其实早在 20 世纪 70 年代就已出现。直到现在，这些想法才开始付诸实践，技术才开始大规模成熟，全世界才清醒地认识到，为了保持地球的宜居性，必须遏制、停止甚至扭转二氧化碳的排放。

脱碳是经济和产业向零碳甚至负碳运行的方向发展。在脱碳的世界里，我们不再产生二氧化碳，也不再向我们本已脆弱的大气层排放过多的二氧化碳，而且我们还会补偿无法减少的排放。并非所有行业都能实现脱碳。例如，化学工业始终需要碳作为有机化合物的组成部分。对于这些行业来说，去化石化是一种更合适的方法。

去化石化是指工业和经济与化石能源和化石资源完全脱钩。这包括不再使用化石能源、用可再生材料替代石油基塑料以及捕集碳排放。即使是使用碳作为基本组成部分的行业也在迅速摆脱石化，即转向使用非化石碳。

# 什么是碳捕集、利用与封存 (CCUS)?

CCUS 指的是在减少全球排放和帮助实现气候目标方面发挥关键作用的一整套技术。这些技术可以通过三种不同方式来解决碳排放问题:

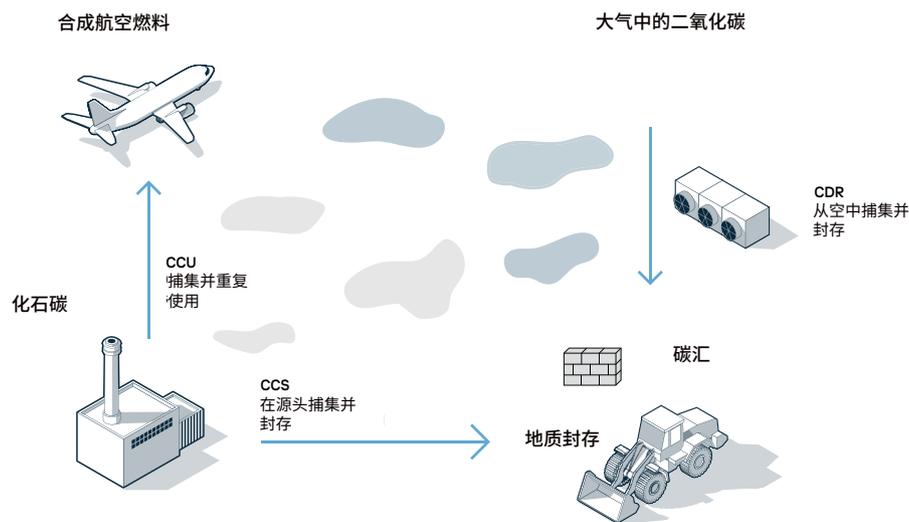
## 1. 通过点源捕集避免/减少排放

工业设施和发电厂在运营过程中, 通过制造过程或燃烧化石燃料产生二氧化碳排放。CCUS 用于捕集这些排放物, 而不是将它们排放到大气中。

## 2. 去除大气中的碳

在过去的几个世纪里, 由于人类活动, 数十亿吨的二氧化碳被排放到大气中。由于二氧化碳是一种非常稳定的分子, 它会长期滞留在大气中, 加速地球的自然温室效应, 从而导致气候变化。

CCUS 可以直接从空气中捕集二氧化碳, 从而解决这一问题。这就是所谓的二氧化碳去除, 或 CDR。国际气候变化专门委员会 (IPCC) 将 CDR 定义为从大气中捕集二氧化碳并将其持久封存在存储容器或产品中的人类活动。



### 3.封存或利用捕集的碳

捕集的碳可用于各种各样的应用 (CCU) 或被永久封存 (CCS)。

碳封存本质上是一个废物处理过程,其中二氧化碳就是废物。可以将其封存在地下深处的多孔岩层中,例如枯竭的气田或油田,或盐水层中。其他方法,如二氧化碳矿化,也正在试验和开发中。

二氧化碳也是制造新产品的宝贵原材料。通过利用现有的碳而不是提取新的化石燃料,我们有可能创建一个循环系统,并帮助多个行业实现摆脱化石。电子燃料、化学品和塑料都是可以从捕集的碳中受益的产品。

二氧化碳已被广泛应用于许多领域。例如,它可以注入温室以促进植物生长,用于制造碳酸饮料,或用作冷却系统中的制冷剂。

如果我们要打造一个实实在在的循环系统,就需要有基础设施来连接价值链的捕集部分和封存部分。捕集的碳可以通过管道、公路、铁路或海运运输,具体取决于距离和预期的最终用途。无论运输方式如何,二氧化碳通常都会经过干燥和压缩,有时也会液化。

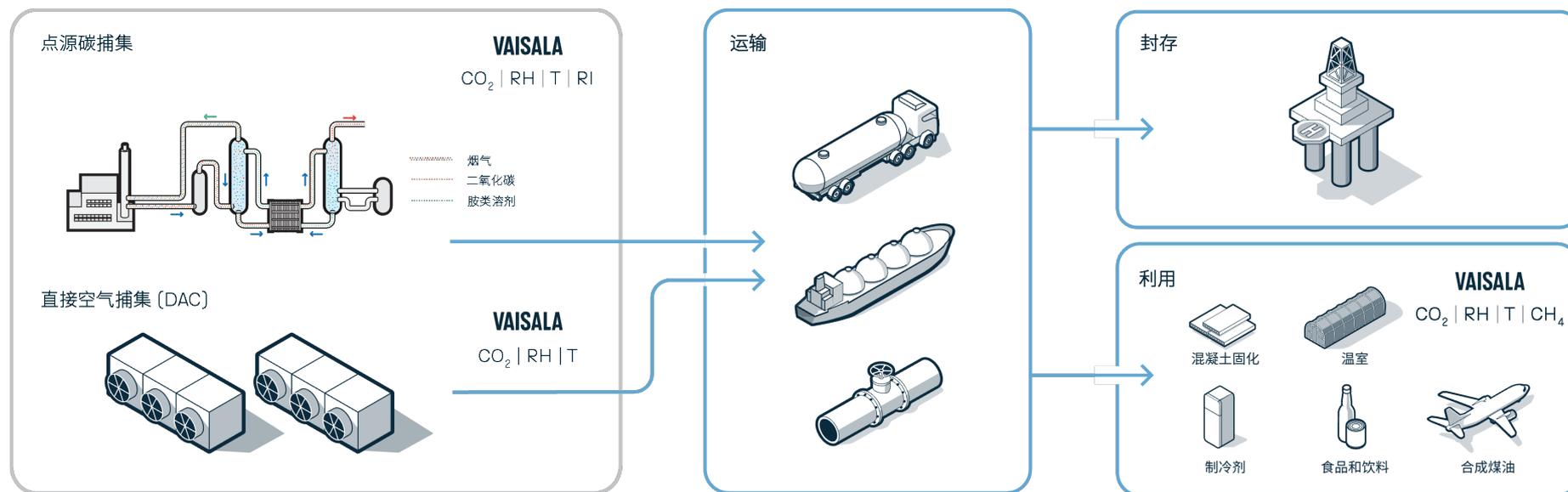


图 1:CCUS 价值链。

# CCUS 在减缓气候变化中的作用

根据国际能源署 (IEA) 的说法, CCUS 在向净零排放转型过程中发挥着核心作用:

1. 解决现有基础设施的排放问题
2. 低碳氢气 (蓝色氢气) 的生产途径
3. 针对非常具有挑战性的排放问题的解决方案
4. 清除大气中的碳

配备 CCUS 系统的燃煤和燃气发电厂可以为间歇性可再生能源发电量不断增加的电网提供系统平衡服务和灵活性。

在 IEA 报告中描述的一种情况下, 到 2070 年, 预计 60% 的低碳 H<sub>2</sub> 将是绿色的, 40% 是蓝色的 (来自配备了 CCUS 的化石燃料生产)。

水泥、钢铁和化工行业在实现净零排放方面面临重大挑战, 因为它们在生产过程中使用碳或释放二氧化碳作为副产品。对于这些行业来说, 点源碳捕集技术将是实现净零排放的关键因素。

根据 IEA 的一份报告, 预计到 2070 年, 大气中将残留 2.9 千兆吨已排放的二氧化碳, 需要通过碳清除来抵消。

点源碳捕集技术已经存在几十年了。最初,石油和天然气公司从天然气中提取二氧化碳,并将其注入油田,以增加石油产量。直到近些年,碳捕集技术的部署及其大规模应用仍然进展缓慢。然而,如今有明显迹象表明,CCUS正在发展成为一种被广泛认可的气候工具。近年来,项目储备大幅增加,政策雄心和行动也比以往更加强大。

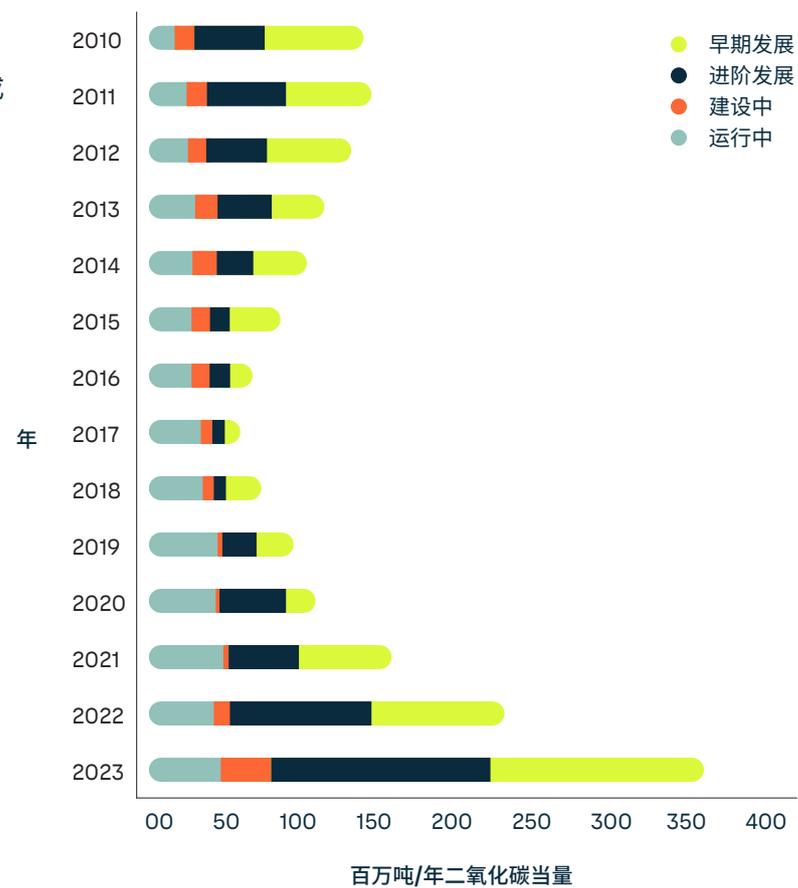


图 2:2010 年以来商业设施储备容量(来源)

# 驱动因素

推动 CCUS 采用的因素有哪些?答案在于缓解气候变化的迫切需要,以及对 CCUS 作为可能的解决方案之一的日益认可。



净零承诺



不断增加的政治支持和投资



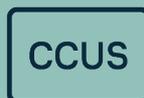
新的商业模式



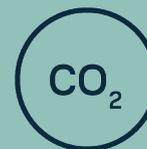
不断变化的监管环境



应对气候变化的紧迫感



认识到 CCUS 是一种可行的脱碳工具,特别是在具有挑战性的行业



二氧化碳短缺:从长远来看,还需要二氧化碳作为化工行业和电子燃料生产的原料

# 挑战

如果要成功实施 CCUS, 必须解决资金难题、简化法律复杂性、鼓励市场发展并促进社会接受。



## 能源和成本密集度

CCUS 项目历来成本高昂, 其中捕集阶段成本更高。



## 基础设施

需要同时发展完整的价值链。  
非技术挑战源于法律的复杂性和跨州项目。



## 收入来源和市场发展

二氧化碳封存缺乏资金激励。  
二氧化碳的利用具有商业意义, 但市场仍在形成之中。  
需要政策支持来促进供给和需求。



## 社会认可

缺乏社会认可会延缓 CCUS 项目的发展, 甚至导致项目被取消。

# 可靠的测量——成功管理的关键

尽管碳捕集技术已经成熟,但降低成本可能比较困难,因此,高效利用捕集工厂和优化流程至关重要。

在开发新的捕集技术时,可靠的测量是理解和优化工艺效率和过程动力学以及证明捕集率的关键。

## 优化捕集率

连续监测功能可让您测量进入和离开捕集过程的每个碳分子,实时优化工艺产量。

## 改进过程控制

二氧化碳测量可以确定整个过程中的碳含量,帮助确定流程是否按预期运行。

## 提高成本效益

碳捕集是效率和成本之间的平衡。根据 Brandl 等人 (2021 年) 的研究,当捕集率超过 90% 时,能源和成本支出会逐渐增加。例如,对于开放式循环燃气发电厂来说,捕集率从 90% 提高到 96%,成本会增加 12% 到 15%。

但要达到 99% 的捕集率,成本很可能会翻倍。为了能够准确定义捕集率,必须选择坚固、可靠、只需很少维护或无需维护的测量技术。

当捕集率接近 100% 时,成本开始急剧增加

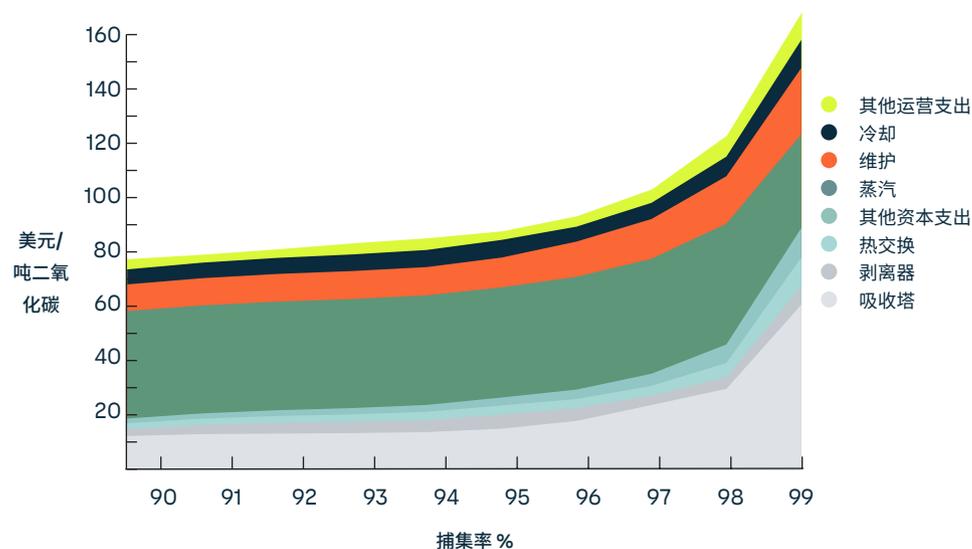


图 3: 燃气发电厂的碳捕集率和成本 (来源: Brandl 等人, [2021 年], 《捕集率超过 90%: 可能, 但代价是什么?》国际温室气体控制杂志)

## 为什么在线测量对于直接空气捕集至关重要

尽管 DAC 系统中的吸附剂材料具有规定的性能水平,但生产批次之间的质量波动会降低该材料吸附二氧化碳的能力。随着时间的推移,吸附材料也可能会降解。准确的在线二氧化碳测量可以揭示材料的实际性能,并测量其老化退化的情况。

准确、实时的在线测量在 DAC 过程中发挥着多种关键作用。例如,它们对于优化吸附和解吸阶段之间的切换时间至关重要。此外,它们在确保捕集过程正常运行方面也发挥着至关重要的作用。例如,如果测量结果显示二氧化碳的体积含量为 95%,那么二氧化碳就可以继续被压缩、液化或进一步提纯。相反,如果二氧化碳体积含量仅为 60 vol-%,则表明过程中存在问题,让您有机会在将二氧化碳送去进一步处理之前解决问题。



# 点源 CCUS 技术简介

## 溶剂型洗涤

### 技术

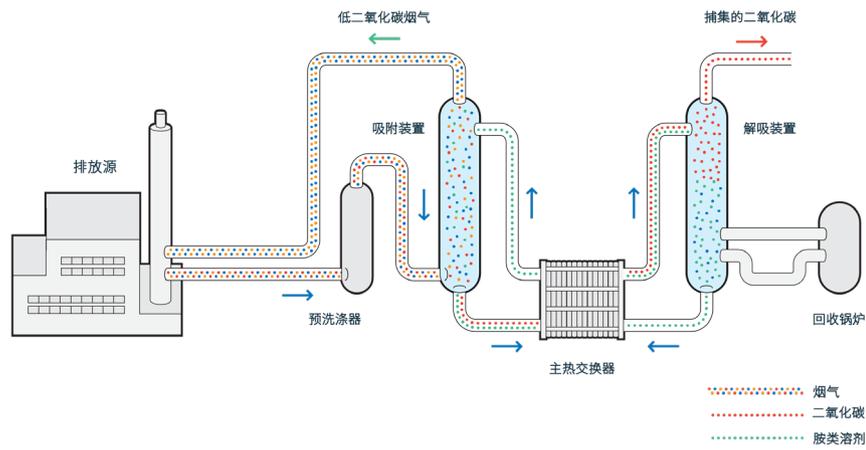
溶剂型洗涤使用液体溶剂，例如胺或热碳酸钾。

### 它是如何工作的？

1. 烟气中的二氧化碳与溶剂结合并从气流中分离 (吸收)。
2. 溶剂在剥离器中加热以释放二氧化碳 (解吸)。
3. 再生溶剂经冷却后重新利用。
4. 高浓度的二氧化碳被收集起来，并在封存或利用前进行进一步处理。

### 为什么测量很重要？

吸收前和解吸后的二氧化碳浓度测量对于评估捕集率 (即捕集过程的效率) 至关重要。出口二氧化碳浓度下降可能表明存在胺降解、溶剂污染或设备故障等问题。通过测量二氧化碳含量来检测这种下降, 可以及早干预, 解决这些问题。液体浓度测量有助于检测溶剂的降解情况, 确保高效的工艺流程。



## 案例 Amager Bakke 垃圾发电厂的点源碳捕集技术

哥本哈根的 Amager Bakke 垃圾发电试验工厂采用维萨拉 MGP261 多气体探头监测进入的焚烧炉废气, 并使用维萨拉 MGP262 测量提取的二氧化碳的纯度。维萨拉 GMP251 CARBOCAP® CO<sub>2</sub> 探头用于检查工厂废气中碳捕集后的二氧化碳水平。

照片: Hufton&Crow / ARC

了解更多信息:



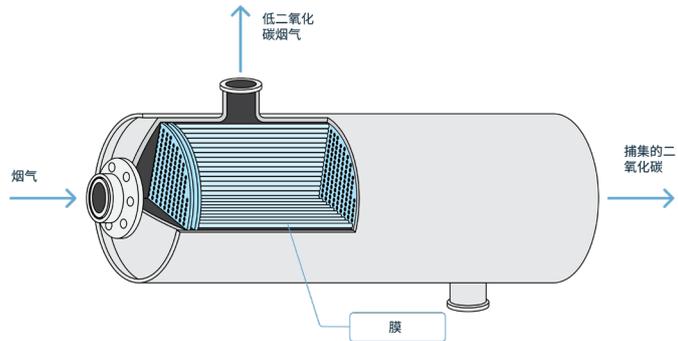
## 半透膜

### 技术

例如,半透膜技术使用聚合膜。实现高二氧化碳纯度和选择性的能力取决于膜类型、压力、温度和工艺湿度。

### 它是如何工作的?

- 1.烟气进入膜组件,膜上的孔选择性地允许二氧化碳分子渗透,同时排除其他气体。
- 2.分离出的二氧化碳通过膜模块收集并进一步处理。



### 为什么测量很重要?

在膜型系统中,入口和出口处测量的二氧化碳浓度直接表明膜的选择性和效率。二氧化碳浓度数据将显示膜的性能是否不佳,从而表明是否需要维护或调整。

## 固体吸附剂

### 技术

固体吸附剂系统通常使用 MOF、活性炭或沸石等材料。这类系统的主要优点是高选择性和高二氧化碳容量。固体吸附剂系统有许多不同的工艺配置和分离技术。

### 它是如何工作的?

- 1.烟气通过含有固体吸附剂材料的反应器(吸附)。
- 2.二氧化碳分子附着在吸附剂表面,直至达到饱和状态。
- 3.根据吸附剂材料的不同,可以使用温度、压力和/或湿度来释放二氧化碳并使吸附剂再生。在多个吸附剂容器之间切换可实现连续的流程。

### 为什么测量很重要?

通过了解二氧化碳浓度,可以确定吸附材料的容量和饱和点。该信息对于优化吸附和解吸循环、系统性能和材料寿命至关重要。捕集效率的下降可能表明吸附剂正在降解,因此需要更换。

# 直接空气捕集技术简介

DAC 技术可以从大气中捕集二氧化碳分子。由于需要将二氧化碳浓度从大气浓度(约400 ppm)提高一千倍以上才能达到接近 100% 的纯度,因此 DAC 的能耗非常高。

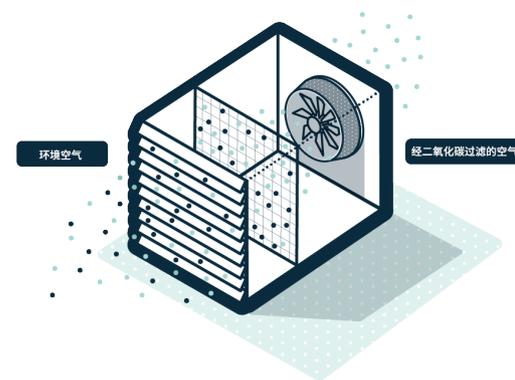
## 技术

目前已有几种 DAC 技术(如使用固体吸附剂和液体溶剂),但它们处于不同的发展阶段。DAC 系统通常是模块化的,捕集率从几公斤到百万吨级不等。

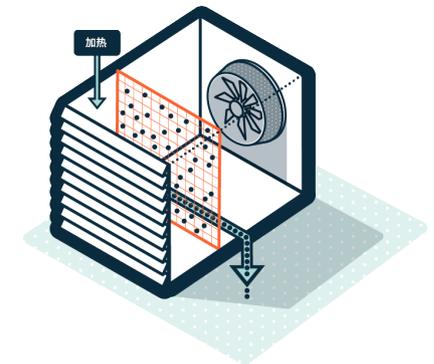
## 它是如何工作的?

- 1.环境空气被迫通过过滤材料(固体吸附剂)。
- 2.到一定程度,吸附剂就会饱和,无法再吸附更多的二氧化碳。
- 3.通过升温、减压/抽真空或两者结合等方式提取二氧化碳,并收集起来以进一步利用或封存。

第 1 阶段  
吸附



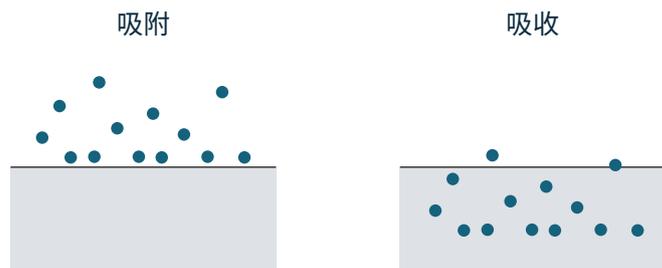
第 2 阶段  
再生



## 为什么测量很重要？

在研发阶段，准确测量低浓度二氧化碳对测量捕集效率、了解工艺动力学和优化工艺尤为重要。从吸附剂中提取二氧化碳时，还需要对低浓度二氧化碳进行准确测量。

准确的湿度测量和控制也很重要，因为湿度通常会影响吸附材料的性能。



**吸附**是指二氧化碳分子附着在固体材料表面形成弱相互作用的过程。

**吸收**是指二氧化碳分子溶解并与液体溶剂发生反应或形成化学键的过程。

## 案例 Soletair Power HVAC 集成捕集系统的直接空气碳捕集

Soletair Power 从空气中提取二氧化碳的特殊解决方案依靠维萨拉可靠的传感器来准确测量二氧化碳水平。该捕集系统通过真空变温吸附技术捕集空气中的二氧化碳，在降低建筑能耗的同时保持室内空气质量水平不变。

了解更多：



照片：Soletair Power, 2024 年

# 用于 CCUS 应用的维萨拉测量解决方案



## MGP241 -- 新品!

专用碳捕集探头, 适合重负荷使用



## MGP260

二氧化碳、甲烷和湿度现场测量仪器



## GMP251

用于 % 级二氧化碳测量



## GMP252

用于 ppm 级二氧化碳测量



## GMP343

更精确、更坚固耐用的二氧化碳探头, 可满足苛刻的测量要求



## PR53GP

用于液体溶剂型碳捕集工艺的在线折光仪



Indigo500 系列数据处理单元  
可定制的仪器平台, 用于改进过程测量



## WXT530

紧凑封装, 可实现准确可靠的天气测量



# CCUS 测量仪器的 5 大注意事项

只要稍加研究,就能在为点源或直接空气捕集应用选择测量技术时做出更明智的选择。以下是在比较不同制造商的产品时需要注意的 5 大事项:

1. 易于安装和维护的仪器可为您节省时间和资金。
2. 强大的技术可避免频繁的维护,从而节省更多的时间和资金,并避免流程停机。
3. 紧凑的探头占用空间小,可减少 CCUS 解决方案的总体占地面积。
4. 具有长期稳定性的测量技术在多年后仍能保持精确;而不具有长期稳定性的测量技术则几乎会立即发生漂移。传感器漂移可能意味着您的流程运行不准确而您却没有意识到。
5. 实时和原位测量功能可避免人工采样和载气的需求,意味着您可以立即做出反应,解决各种工艺变化或潜在的性能问题。

Vaisala CARBOCAP® 传感器配有电可调 FPI 滤波器,可测量气体吸收率,并在没有发生吸收的波长下进行参考测量。该参考测量可补偿光源强度的各种潜在变化以及光路中的污染和灰尘积聚,使 CARBOCAP® 传感器长期保持高度稳定。

Vaisala HUMICAP® 是一种电容型薄膜聚合物传感器,包括一个基板,基板上的两个导电电极之间附着一层聚合物薄膜。当环境空气的相对湿度上升或下降时,聚合物相应吸收或释放水气。传感器周围的相对湿度发生变化时,聚合物薄膜的介电特性也会变化,传感器的电容就会随之变化。传感器的电容转换成湿度读数。



### 案例 Carbonaide 混凝土固化过程的精确二氧化碳测量

Carbonaide 在碳固化过程中使用了维萨拉的二氧化碳测量技术,通过将混凝土转变为碳封存器来减少混凝土生产过程中的碳排放。得益于维萨拉的技术,Carbonaide 固化过程的有效性可以通过过程测量得到高效、准确的验证,而无需不断对混凝土产品进行取样。

了解更多:



[www.vaisala.cn](http://www.vaisala.cn)

维萨拉是测量仪器和智能化应用在应对气候变化的积极探索者和行动者。我们提供可靠的测量设备和数据,助力客户提高资源利用效率,并推动能源转型,同时也致力于保障大众的安全以及提升社会福祉,让世界变得更美好。我们拥有近 90 年专业知识的深厚积淀,更拥有一支超过 2,300 名专业人员组成的精英团队,我们尽心竭力保护地球家园。维萨拉 A 股股票在纳斯达克赫尔辛基证券交易所上市。

[www.vaisala.cn](http://www.vaisala.cn)

## 准备好优化碳捕集技术的工艺效率了吗?

请联系我们的专家团队,了解我们的全部产品和服务,并商讨我们该如何帮助您改进工艺流程和应用。

[www.vaisala.cn/zh/lp/contact-form](http://www.vaisala.cn/zh/lp/contact-form)



欢迎联系我们,  
讨论您的工艺  
和测量需求。

参考编号 B212910ZH-B ©Vaisala 2024

本资料受版权保护,所有版权为维萨拉及其各个合作伙伴所有。保留所有权利。所有徽标和/或产品名称均为维萨拉或其单独合作伙伴的商标。未经维萨拉事先书面同意,严禁以任何形式复制、转让、分发或存储本手册中的信息。所有规格(包括技术规格)如有变更,恕不另行通知。