制定《低浓度二氧化碳捕集技术规范》行业标准

编制说明

一、任务来源及简要编制过程

1. 任务来源

工业和信息化部办公厅关于印发2023年第三批行业标准制修订和外文版项目计划的通知（工信厅科函〔2023〕291号），全国化学标准化技术委员会于2025年完成《低浓度二氧化碳捕集技术规范》化工行业标准（项目编号2023-1409T-HG）的制定工作。该标准由全国石油和化学工业联合会归口，由中海油天津化工研究设计院有限公司负责组织起草工作。

2. 简要编制过程

2.1 前期调查和准备工作

标准起草单位接到上级部门下达的标准制定计划后，首先查阅了国内外标准及有关技术资料，并广泛征求对制定标准工作的意见，组成了标准起草小组。标准起草小组对调查情况进行汇总，完成了制定本标准的文献小结。

2.2 召开工作方案会

全国化标委无机化工分会（SAC/TC 63/SC1）（无机分会）于2024年3月在成都组织召开了制定标准工作方案会。会上起草单位和相关代表针对文献小结进行了认真仔细的讨论，并提出标准框架。中海油天津化工研究设计院有限公司根据企业专家的意见编制征求意见稿和编制说明。

2.3 网上征求意见阶段

2024年6月由中海油天津化工研究设计院有限公司负责将标准征求意见稿（草案）、编制说明（草案）寄给委员和生产厂家征求意见，并在石化联合会网站和www.trici.cn网上公开征求意见。

二、制标的目的意义

在《国家标准化发展纲要》中指出要完善绿色发展标准化保障，要研究制定生态碳汇、碳捕集利用与封存标准。实施碳达峰、碳中和标准化提升工程。

在工业和信息化部发布的《“十四五”工业绿色发展规划》指出到2025年，工业产业结构、生产方式绿色低碳转型取得显著成效，绿色低碳技术装备广泛应用，能源资源利用效率大幅提高，绿色制造水平全面提升，为2030年工业领域碳达峰奠定坚实基础。加快关键共性技术攻关突破，包括集中优势资源开展减碳零碳负碳技术、碳捕集利用与封存技术的实

现突破。

二氧化碳（CO_2）分子量 44，俗名碳酸气，是碳的高价氧化物。CO_2 比空气重，约为空气重的 1.53 倍，是无色而略带刺鼻气味和微酸味的气体。

CO_2 是地球产生“温室效应”的罪魁祸首，随着各国 CO_2 排放，温室气体猛增，对生命系统形成威胁。在这一背景下，世界各国以全球协约的方式减排温室气体，2020 年 9 月，中国在联合国大会上向世界宣布了 2030 年前实现“碳达峰”、2060 年前实现“碳中和”的目标。据统计，我国每年排放到大气中的 CO_2 大约在 110 亿吨左右，可见 CO_2 排放量十分巨大，对环境影响十分严重。

CO_2 的存在相当广泛，自然中存在于 CO_2 气田、石油溶解气、天然气等；人类社会生产力的高速发展，不断消耗大量的天然含碳资源，使大气中 CO_2 迅速增加，工业上，可回收的 CO_2 的工业尾气有：石灰窑尾气、锅炉烟气、各种生物发酵气（如酒精发酵、生物丁醇发酵），沼气，以及煤造气（水煤气、半水煤气）、各种变换气等。CO_2 的排放不仅加剧“温室效应”，也造成 CO_2 资源的严重浪费。同时 CO_2 用途广泛，用于食品加工、机械制造、精细化工等行业。变废为宝合理利用 CO_2 显得意义尤为重大，也是贯彻我国实施科学发展观、能源再生利用、保护环境、构筑和谐社会的一项重要工作。

碳捕集利用与封存简称 CCUS，是把生产过程中排放的 CO_2 进行捕获提纯，继而投入到新的生产过程中进行循环再利用或封存的一种技术。其中碳捕集是指将大型发电厂、钢铁厂、水泥厂、石化企业等排放源产生的 CO_2 收集起来，并用各种方法储存，以避免其排放到大气中。该技术具备实现大规模温室气体减排和化石能源低碳利用的协同作用，是未来全球应对气候变化的重要技术选择之一。碳捕集与封存技术是实现双碳目标的最有效的措施之一，其中碳捕集是实现这一目标的首要关键环节。

碳排放源的 CO_2 浓度决定了回收利用采用的方法，随着浓度升高，回收利用成本随之降低。目前被广泛应用的为高浓度点源（浓度在 50%-90%）的回收，主要来自乙醇、氨和天然气加工的排放，无需化学方法，可通过脱水和压缩设备实现，成本低；低浓度点源，排放量约占排放总量的 80%，主要来自于石化行业、煤化工、电力热力、金属冶金行业等，特点是气量大浓度低，回收成本高，这部分气源的捕集回收利用更应该是国家关注的重点，也是我国时间 2030 年碳达峰与 2060 年碳中和的重要技术选择。

目前，关于低浓度 CO_2 捕集还没有统一的标准，因此有必要制定针对低浓度 CO_2 捕集技术的行业标准，使捕集技术的要求更明确，关键技术指标更细化。

三、国内外情况简述

《全球碳捕集与封存现状 2021》报告显示，仅在去年一年，全球封存能力就增加了 32%。现在项目计划中有 135 个商业 CCS 设施，其中 27 个已经全面投运。这些项目来自各行各业，包括水泥、钢铁、氢气、发电和直接空气捕集。

CO_2 捕集方式包括燃烧前碳捕集、燃烧后碳捕集、富氧燃烧、化学链捕集、直接空气碳捕集等。不同技术路线下又有吸收法、吸附法、膜捕集法等技术方法。目前化学链燃烧和富氧燃烧尚处于实验室基础研究或半工业示范阶段，直接空气捕集国内外均处于中试阶段。燃烧前（后）捕集主要包括吸收法、吸附法、膜分离法以及深冷法。其中燃烧前吸附、低温捕集国内外均处于工业示范的中期，燃烧后的化学吸收法是国内外发展最快的方法，国外已经进入商业化应用阶段，国内处于工业示范的末期，将进入商业化应用过程。。

1) 吸收法

全球正在运行的 CCUS 项目中，大多数采用的 CO_2 分离方法为吸收法。吸收法分为化学吸收法和物理吸收法。

化学吸收法吸收剂与 CO_2 的结合能力强，适用于中低 CO_2 浓度、低 CO_2 分压的气源。核心是吸收剂，**混合有机胺**溶液是目前应用最广泛的主要吸收剂，优点：具有 CO_2 吸收能力强，处理量大，捕集效率高，产品气纯度高的优势，技术成熟度高；不足：存在氨逃逸问题。**氨水法**吸收反应生成碳酸铵和碳酸氢铵，吸收容量较大再生能耗较低，且碳酸氢铵和碳酸铵易变为沉浆造成设备腐蚀堵塞，同时氨逃逸问题限制了该方法的发展。**热钾碱法**是应用比较早的 CO_2 吸收方法，吸收成本低再生能耗较小，但吸收速率慢，需添加活化剂，如三氧化二砷。三氧化二砷剧毒，对操作工况要求非常严格，目前已被取代。

物理吸收法依靠 CO_2 与气源中其他租房的溶解度差异实现 CO_2 分离脱除。适用于压强大、中高 CO_2 浓度、气源中其他气体与 CO_2 的溶解度差异较大的情况。低温高压是物理吸收法的最佳操作条件，吸收剂如甲醇（低温甲醇洗法 Restisol）、碳酸丙烯酯（Flour 法）。如甲醇吸收剂不易降解、黏度小且有较高的稳定性，但必须在低温的环境下操作运行，工艺较复杂，物理吸收法目前主要应用于天然气的开采以及加工处理。

2) 吸附法

吸附法适用于压强大，气源中其他气体与 CO_2 的溶解度差异较大的气源。优点：对环境友好，能耗低，工艺流程简单，自动化程度高。不足：对 CO_2 的选择性较低，分离效率不高，不耐高湿气源，吸附剂在运输及使用过程中易损耗。限制其发展的主要原因常用吸附剂的吸附容量较小、吸附容量高功能调控方便的新型吸附剂造价成本高，

尚不能量产，当气源中水分含量较多时，会严重影响吸附效果，应用于规模较大的碳捕集项目的难度较高。

3) 膜分离法

膜分离法是依靠 CO_2 在分离膜两侧的溶解度或扩散率的差异，将 CO_2 从混合气体中分离出来的方法。膜分离法适用于压强大、CO_2 分压高、气源杂质气体少且与 CO_2 的渗透速率差异较大的气源。优点：运行过程能耗低，设备紧凑性好、模块化设计，工艺简单易维护，更加环保节能。不足：对气源要求高，不耐高温，大规模分离 CO_2 有一定的困难，尚不能连续作业，分离容量小，膜材料成本相对较高，限制了膜材料的应用。

4) 深冷法

深冷法是利用气源中各组分的沸点不同，在低温下将气体中各组分按工艺要求冷凝下来，然后依照各物质蒸发温度的不同，用蒸馏法加以分离。适用于气源中 CO_2 的浓度含量高（CO_2 体积分数＞60%）、分压大的情况。优点：工艺耗水少，环境无污染。不足：冷凝过程能耗大，设备庞大。目前工业应用少，制冷过程能耗是主要问题。

综上，化学吸收法国外已处于商业应用阶段，国内已处于工业示范的末期，本次制定标准将以化学吸收法为主线进行制定。

四、相关标准资料

GB/T 51316-2018《烟气 CO2 捕集纯化工程设计标准》，该标准适用于新建、改建、扩建烟气 CO_2 捕集纯化的工程设计，属于纯工程设计要求，关注的是设计层面；而本次制定标准主要涉及 CO_2 的捕集工艺的具体技术内容要求，关注的是捕集技术的具体实施层面，与 GB/T 51316−2018 内容不同。

五、制标原则

积极采用国际标准和国外先进国家标准，有利于促进技术进步，有利于合理利用资源，保护环境，保护人们的生命财产安全，并遵循科学性、先进性、统一性的原则。

六、编制标准的依据

GB/T 150（所有部分） 压力容器

GB/T 151 热交换器

GB/T 4272 设备及管道绝热技术通则

GB 15603 危险化学品储存通则

GB/T 29639 生产经营单位生产安全事故应急预案编制导则

GB/T 50087 工业企业噪声控制设计规范

GB/T 50441　石油化工设计能耗计算标准

GB/T 51316　烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准

AQ 3013　危险化学品从业单位安全标准化通用规范

AQ 3028　化学品生产单位受限空间作业安全规范

HG 20571　化工企业安全卫生设计规范

HG/T 21559.1　不锈钢网孔板波纹填料工程技术规范

NB/T 47004.1　板式热交换器　第 1 部分：可拆卸板式热交换器

NB/T 47041　塔式容器

TSG 21　固定式压力容器安全技术监察规程

七、标准主要内容

1.　范围

1.1　标准范围

本标准规定了低浓度二氧化碳捕集的化学吸收剂要求、捕集技术、捕集效果评价。

本标准适用于工业排放气中二氧化碳浓度在3 %~55 %范围的化学吸收法捕集。

1.2　确定的依据

1.2.1　石化行业 CO_2 气源

石油化工行业以石油为原料生产成品油及化学品，该行业产生的 CO_2 一部分来自化石燃料燃烧后的烟气排放，另一部分来自生产过程中产生的工艺排放，以工艺排放为主，如催化裂化、常减压、制氢、连续重整、加氢和延迟焦化等过程。常见的工艺排放其主要成分如表 1 所示，从表 1 可见，石油化工行业排放气中 CO_2 的浓度范围在 9%~55%之间。

表 1　石油化工行业常见 CO_2 气源主要组成

气源	组成（体积分数%）				
	H_2	**CO_2**	CO	N_2	其他
轻烃制氢变换气	77.94	**16.77**	1.68		3.61
制氢 PSA 尾气	32.39	**51.15**	4.78		11.68
克劳斯脱硫尾气	1.20~2.00	**29.00~32.00**	0.07~0.15	60.00~65.00	
制氢转化炉烟气		**19.59**		60.49	19.92
催化裂化烟气		**13.59**	4.38	80.16	1.87
常减压方炉尾气		**10.95**			89.05
重整圆筒炉烟气		**9.51**			90.49

1.2.2　煤化工行业 CO_2 气源

煤化工行业以煤为主要原料，CO_2 的主要来源于煤气化产生的气化气及其变换气，煤焦

化产生的焦炉煤气及其变换气，燃煤烟气和煤化工脱碳过程中的再生气等。煤化工行业常见的 CO_2 气源主要组成如表 2 所示，数据来源于典型工程项目。煤制甲醇、煤制天然气和煤制氢工艺过程中，工艺气经一氧化碳变换后，其 CO_2 浓度一般大于 30.00%，是比较常见的 CO_2 气源。焦炉煤气中 CO_2 浓度约为 3.00%，经一氧化碳变换后能达到于燃煤烟气的 CO_2 浓度相当的水平（10%）。

表 2　煤化工行业常见 CO_2 气源的主要组成

工艺	气源	组成（体积分数%）					
		H_2	CO	**CO_2**	N_2	CH_4	其他
煤制甲醇	部分变换气	46.68	20.43	**32.09**	0.23	0.08	0.49
煤制天然气	部分变换气	48.53	14.61	**36.28**	0.45	0.003	0.13
煤制氢（CO_2 运输）	全变换气	55.03	0.40	**43.60**	0.75	0.15	0.07
煤制氢（N_2 运输）	全变换气	55.00	1.00	**38.50**	5.00	0.04	0.46
煤焦化	焦炉煤气	58.00	9.94	**3.25**	5.80	20.54	2.47
	变换气	62.05	0.33	**11.38**	4.92	19.22	2.10
转化炉/锅炉	燃煤烟气			**11.90**	68.30		19.80
低温甲醇洗	脱碳再生气	0.12	0.34	**90.28**	7.88	0.002	1.38

1.2.3　电力、热力生产行业 CO_2 气源

电力、热力生产行业中，能源的主要消耗形式是煤炭燃烧，其中燃煤电厂每年都会消耗大量煤炭，产生含 CO_2 的燃煤烟气，电力、热力生产行业是 CO_2 排放量占比最大的工业细分行业，燃煤烟气的 CO_2 浓度较低且稳定，在 10%~15%之间，见表 3。

表 3　几组不同来源的燃煤烟气组成

气源	组成（体积分数%）				
	CO_2	N_2	H_2O	O_2	其他
1	**12.10**	60.30	20.00	6.80	0.80
2	**14.63**	73.03	8.00	4.19	0.15
3	**12.43**	70.40	11.84	4.44.	0.89
4	**12.18**	71.50	10.97	5.34	0.01

1.2.4　金属冶炼行业 CO_2 气源

金属冶炼行业中大量生产过程需要消耗煤、石油、天然气等能源，产生的各种烟气也是

CO_2的重要排放源，其中的钢铁行业较具代表性。常见的CO_2气源组成见表4所示，来源于典型工程项目，从表中可见石灰窑尾气中，CO_2浓度较高，一般在28%~35%，其他在10%~20%。

表4　钢铁行业常见CO_2气源主要组成

气源	组成（体积分数%）				
	CO_2	N_2	CO	O_2	其他
石灰窑尾气	**31.02**	60.22	0.64	7.00	1.12
高炉煤气	**22.00**	51.30	22.80	0.10	3.80
转炉煤气	**16.00**	21.50	60.00	0.47	2.03
热轧炉烟气	**16.80**	80.70	1.40	1.10	0

综上所述，本次制定标准根据标准工作方案会上各位参会专家的意见和建议，以及以上收集的相关资料，确定低浓度CO_2的浓度范围在3%~55%之间。

2. 术语和定义

标准中引入以下术语定义，便于标准使用者理解：

2.1 化学吸收法：该术语参照GB/T 51316-2018《烟气CO_2捕集纯化工程设计标准》的描述，进行了适当修改，将烟气改为工业排放气，即化学吸收剂在吸收塔内与工业排放气中的二氧化碳进行化学反应，生成化合物，并在解吸塔内经升温后释放出吸收的二氧化碳，完成二氧化碳与排放气中其他气体分离的方法。

2.2 解吸：在一定的条件下，从吸收了二氧化碳的化学吸收剂中，分解释放二氧化碳的过程。

2.3 富液：根据JB/T 12909-2016《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》中对于富液的定义，即吸收CO_2后未再生的吸收剂溶液。

2.4 贫液：根据JB/T 12909-2016《燃煤烟气二氧化碳捕集装备》中对于贫液的定义，新鲜的或再生后用于吸收二氧化碳的吸收剂溶液。

2.5 吸收塔：使用化学吸收剂采用化学吸收法吸收工业排放气中二氧化碳的塔器设备。

2.6 解吸塔：将富液中的二氧化碳解吸出来，使富液转化为贫液的装备。又称再生塔。。

2.7 吸收剂复活：采用加热回收装置将降解的吸收剂中尚带有活性成分的吸收剂经蒸汽蒸发回收后重新使用。

3. 化学吸收剂的要求

3.1 种类

化学吸收法的基本原理是：碱性吸收剂有选择性地与排放气中的 CO_2 发生化学反应，生成不稳定的盐类，如碳酸盐、碳酸氢盐、氨基甲酸盐等，该盐可在一定条件下逆向解吸出 CO_2，从而实现 CO_2 的脱除和再生过程。吸收剂是化学吸收法捕集脱除 CO_2 的核心，选择合适的吸收剂是化学溶剂吸收碳捕集项目的关键。根据目前是化学吸收剂作用方式，分为均相有机胺吸收剂、相变吸收剂、离子液体吸收剂三大类。

3.1.1 均相有机胺吸收剂

分为单一胺吸收剂和复合胺吸收剂，早起的化学吸收剂为单一胺吸收剂，如以乙醇胺（MEA）为代表的，如伯胺、仲胺、叔胺、环状有机胺、直链有机多胺基等。种类繁多，有直链有机胺和环状有机胺，具有成本低廉、高效率和可循环利用等优点。但也存在一些明显的缺陷，较难同时满足高吸收速率和高吸收容量及低反应热等要求。伯胺和仲胺反应速率较快，但吸收容量较小；叔胺反应速率相对较慢，但吸收容量较大，还会存在高能耗和强腐蚀性。例如 MEA 吸收剂能耗高一方面是由于吸收热较大，解吸过程需提供更多的能量。另一方面，MEA 吸收剂配制过程中，受溶液粘度和碱性胺液腐蚀性的限制，吸收剂中胺分子含量通常不超过 30%，大部分为水。捕集解吸温度通常在 100℃以上，吸收剂中的水在解吸塔中气化消耗的热量是胺法捕集能耗高的最主要原因。为克服单一胺的缺点，开发出了复合胺吸收剂，它由两种或两种以上的单一胺复合而成，如伯胺-叔胺、仲胺-叔胺、环状有机胺-叔胺、多胺-叔胺等。是通过将具有高吸收能力和低解吸能耗的有机物与具有快反应速率和低吸收能力的有机物混合制得，以此来提高吸收效率的方法。其可以改变溶液的整体性质，提升 CO_2 的吸收能力。

复合胺吸收剂是将不同类型的伯胺、仲胺和叔胺按照一定比例进行混合后所得的溶液，其吸收 CO_2 反应机理与上文所述伯胺、仲胺、叔胺相一致，二者优缺点互补，综合不同有机胺性能，提高了吸收速率与容量，从而能够综合降低再生能耗和提高吸收剂整体性能。。

3.1.2 相变吸收剂

相变吸收剂是一种新型的 CO_2 吸收剂，由有机胺和有机溶剂组成，如伯胺-酯类、多胺-酰胺、伯胺-醇类等。它能够在吸收塔中与 CO_2 发生反应。反应后吸收剂会被送入一个分相装置静置分层。经过分离后 CO_2 富液会被送入解吸塔，而 CO_2 贫液则会被返回吸收塔重新利用。降低了解吸塔的负荷，因此吸收剂的再生能量消耗也显著减少。该过程既能够提高吸收过程和解吸过程的效率，同时还能有效减少再生过程中的显热和汽化潜热的消耗，进而降低能耗的成本。河北建滔有一个 20 万吨的工业示范项目，运行六个月，目前处于停滞状态，工业上的应用还存在技术问题，如水多时的分相问题、挥发和降解的问题、工业上连续

运行的问题等。

3.1.3 离子液体吸收剂

离子液体是一种环保型的 CO_2吸收剂，分为传统离子液体（如咪唑型离子液体）和功能化离子液体（如氨基功能化离子液体、双氨基功能型离子液体）。它具有低蒸汽压、良好的稳定性和可调分子结构等优点。然而，由于离子液体的合成过程复杂且价格昂贵，CO_2解吸能耗大、捕获效率低、黏度高等。制约了它在工业中的应用，目前国内南化院已有一个千吨级的示范项目。

均相有机胺吸收剂是目前应用最广泛的化学吸收剂，并已经成功工业化运行多年，相变吸收剂和离子液体吸收剂目前正式工业化应用还存在一些问题需要解决，进行了工业示范项目，但它们是化学吸收剂发展的方向，在本次标准制定过程中依据工信部要求，标准应具备一定的先进性、前瞻性，能够引领和推动相关行业或领域的发展，能够促进技术进步和产业升级的原则，将相变吸收剂和离子液体吸收剂引入标准中。

3.2 选择原则

化学吸收剂性能决定了吸收反应的可行性，选择宜遵循以下原则：

——有较好的选择性，与CO_2反应良好且不与其他气体组分产生作用；

——吸收速率高，吸收速率越大越容易快速实现物质与能量的平衡；

——挥发性低，挥发性越低溶剂损失越少；

——黏度低，黏度越低吸收过程中传质阻力越小，有利于气液两相的充分接触反应；

——吸收容量大，再生性能好，可减少吸收剂使用成本；

——稳定性高，不易降解

——从安全和环保角度考虑吸收剂必须是低毒或者是无毒，同时要求腐蚀性低；

——易获得，经济性好。

3.3 性能要求

化学吸收剂性能直接决定了吸收反应的可行性、吸收效果以及能耗，其应具备吸收速率快，吸收容量大和再生能耗低，其次是安全稳定、环境友好、对设备腐蚀小和经济性好等特性。应满足以下要求：

——CO_2捕集率宜不小于90 %；

——吸收剂再生能耗不应大于2.8 GJ/tCO_2；

——吸收剂的损耗不大于1 kg/tCO_2；

——系统捕集能耗（不含压缩液化）不应大于3.1 GJ/tCO_2；

——对设备的腐蚀性小。

GB/T 51316-2018《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》中对于设备的捕集率推荐为不低于80%，据了解，国内相关化学吸收法的捕集率已经可以达到90%以上，所以本次制定标准规定不低于90%。吸收剂在使用过程中会发现热降解和氧化降解，造成吸收剂的损耗，

所以在选择吸收剂时应考虑如何减少热降解和氧化降解对吸收剂的影响，吸收剂的损耗要求不大于1 kg/tCO_2，同时要求吸收剂对设备腐蚀性要小。系统捕集能耗中吸收剂的再生能耗是主要部分，企业会积极采用先进的工艺，尽可能利用企业或当地的余热资源，采用如分级解吸工艺，提高解吸效率，降低再生能耗，标准规定再生能耗不大于2.8 GJ/tCO_2，捕集能耗不大于3.1GJ/tCO_2。

4. 捕集技术

本次制定标准，捕集技术首先确定为化学吸收法，因为该方法工艺成熟，国内外商业化应用广，具有较好的实践基础。标准的申报单位新疆敦华绿碳技术股份有限公司是国内从事CCUS（碳捕集、利用与封存）专业化全产业链高新技术企业，2016 年建成投产 10 万吨/年弛放气 CO_2 捕集液化项目，已平稳运行 7 年，是国内连续运行周期最长的低浓度碳捕集装置，2020 年 5 月又在南疆成功建设第二条装置并投产运行，并将相关技术经验推广到水泥行业、钢铁行业、发电行业的生产企业低浓度碳捕集过程中，如海螺集团、新疆八钢集团、陕西国华锦界、京能集团。我们结合所有标准起草单位的技术优势和实际的运行经验进行总结，编制本标准的技术内容。

4.1 基本要求

要求捕集设备的设计、建造应采用技术先进、经济合理、节能环保、安全适用的工艺，并符合 GB/T 51316 等标准的要求。捕集过程中的各项污染物应达标排放。

4.2 捕集装置的组成

低浓度二氧化碳捕集装置应由预处理系统、CO_2吸收系统、CO_2解吸系统、吸收剂复活系统组成。

4.3 工艺流程简述

工业排放气经除尘、脱硫和初步冷却等预处理后，进入吸收塔，与塔顶喷淋下来的化学吸收剂溶液（贫液）逆相接触反应，与 CO_2 生成中间化合物，脱碳后的尾气从吸收塔顶经处理达标后排放，而吸收了 CO_2 的吸收剂溶液（富液）经贫富液换热器与热贫液进行换热后，被送入解吸塔进行再生，解吸气冷凝后进入后续工序。解吸塔底的贫液经过贫富液换热器换热，经冷却器冷却到所需的温度后，重新喷入吸收塔中，从而实现系统的循环，

4.4 工艺流程框图

采用胺化学吸收剂进行低浓度CO_2捕集工艺框图如下。

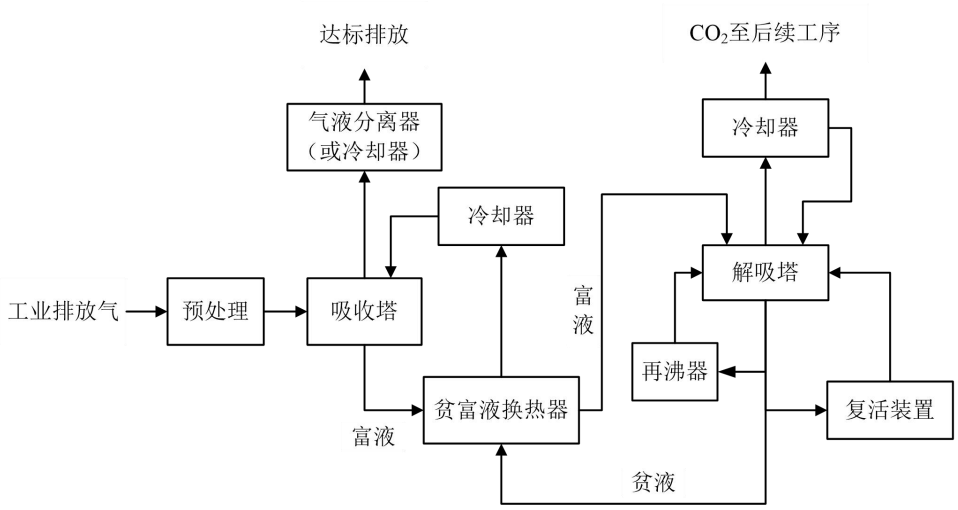

图1　化学吸收法碳捕集工艺框图

4.5　捕集工艺

4.5.1　排放气的预处理

排放气中含有较多的粉尘、颗粒物以及硫化物、氮氧化物等，由于捕集吸收剂很容易受硫化物、氮氧化物等影响，而导致吸收剂失失去活性、能耗增加，应对其进行降温除尘，脱硫脱硝、降低硫化物和氮氧化物等杂质后进入预处理单元，使出口气能满足进入吸收塔的要求。

预处理单元进一步脱除排放气中的污染物并降低原料气温度。预处理塔的出口气在进入捕集设备进行脱碳处理前应满足如下要求：

——排放气的温度应不高于40℃；

——可过滤颗粒物浓度应不高于3 mg/Nm^3；

——氮氧化物浓度应不大于50 mg/Nm^3；

——SO_2浓度不大于10 mg/Nm^3。

GB/T 51316-2018《烟气 CO_2 捕集纯化工程设计标准》中规定粉尘浓度应不高于 5 mg/Nm^3、NOx 浓度应不大于 50 mg/Nm^3、SO_2 浓度不大于 10 mg/Nm^3，还规定了洗涤塔洗涤液 pH 控制在 6～8。本标准规定的颗粒物要求要严于 GB/T 51316。

4.5.2　吸收工艺

4.5.2.1　工艺描述

经过预处理的排放气从吸收塔下部进入吸收塔，与从吸收塔上部的贫液逆流接触，排放气和贫液在吸收塔内接触后发生化学反应，排放气中的 CO_2 被贫液吸收后变成富液。脱碳后的净化气与从吸收塔顶部进入吸收塔上部洗涤段的洗涤水逆流接触，洗去夹带的吸收剂。

4.5.2.2　控制要求

吸收工艺是整个捕集工艺的核心环节，对该工艺过程中的相关参数进行监测十分重要。应定期对进入吸收塔的烟气温度和流量进行检测，保证进入吸收塔的烟气物理指标符合设计

要求，工艺系统能够稳定运行。出了吸收塔的烟气应再次进行检测，主要检测内容包括 pH、杂质含量等，以便掌握 CO_2 的捕集率，对吸收剂吸附性能和塔内运行情况做到及时监控。

工艺控制要求：

——吸收温度为控制在 30 ℃~50 ℃范围内；

——吸收塔的压力应控制在不大于 20 kPa；

——冷却器宜将吸收液温度降至不高于 50 ℃；因为吸收液解吸后变为贫液继续回到吸收塔吸收，吸收塔的温度控制要求是 30 ℃~50 ℃。

——对进出吸收塔的排放气的流量、压力、温度、液位、CO_2 的含量等应进行监测。

4.5.3 CO_2解吸工艺

富液在解吸塔中 CO_2 的解吸的同时完成了吸收剂的再生，即通过温度和压力的双重作用，使 CO_2 从富液中解吸出来，解吸后的富液转变为贫液，可以回到吸收塔中继续使用，完成了吸收剂的再生，所以解吸塔也称谓再生塔。

4.5.3.1 工艺描述

富液经过富液泵加压进入贫富液换热器，与来自解吸塔再生后的贫液进行换热，从解吸塔上部入再生塔。在解吸塔中，塔顶喷淋的富液与塔底再沸器产生的蒸汽进行逆流接触，在温度和压力的作用下，使富液中的不稳定盐发生解吸分解，解吸出 CO_2，富液经过解吸 CO_2 含量降低转变成贫液，在贫液泵的作用下，进入贫富液换热器与吸收塔出来的低温富液换热降温后，再经冷凝器降温后返回吸收塔内，完成 CO_2 的解吸和吸收剂的再生过程。

4.5.3.2 控制要求

解吸工序的工艺控制要求：

——解吸塔塔顶压力应控制在不大于 130kPa（绝压）；

——解吸温度应不大于 110 ℃；

——塔顶冷凝器宜将解吸气的温度降至 40 ℃以下；

——解吸后 CO_2 浓度应不小于 99%（以干基计）。

解吸塔顶压力应控制在不大于 130kPa；解吸温度要求不高于 110℃，因为温度过高将直接影响到捕集的能耗，解吸能耗是捕集能耗的主要部分，进而影响捕集成本的大小，会对捕集后的应用产生影响。为了更好的保证解吸塔的解吸效果，应对进出吸收塔的排放气的流量、压力、温度、CO_2 的含量等应进行监测。

4.5.4 吸收剂复活工艺

由于工业排放气中的杂质较多，吸收剂在使用一段时间后，由于热降解和氧化降解的存在，捕集系统中会不断积累生成胺盐，随着时间推移，吸收剂的性能会不断下降。因此为了保证系统性能，定期将部分贫液送入吸收剂复活单元，在胺回收加热器内用中压蒸汽加热贫液，汽化后的胺进入解吸塔底部，产生的残液应依据规定进行处置。

4.5.4.1 工艺描述

在贫液管线旁路上设置吸收剂复活装置（如胺回收加热器），定期从系统中排出因长期使用产生降解产物的化学吸收剂，此过程中会带走少部分具有活性胺液，此部分胺液经回收加热器中的蒸汽蒸发后，返回到解吸塔重新使用。

4.5.4.2 控制要求

工序的工艺控制要求：

——进入吸收剂复活装置的吸收剂流量应控制在不超过循环量的 5 %；

——胺回收加热器的压力应高于解吸塔压力 10 kPa ~20 kPa；

——排放的降解废液应依规处置。

胺回收加热器设置在从再生塔底部返回吸收塔路线的旁路（分支），主要就是控制胺回收加热器的液位保持稳定，所以要求进入复活装置的吸收剂流量不超过循环量的 5 %，同时要求胺回收加热器的压力应高于解吸塔压力 10 kPa ~20 kPa，以保证能顺利循环。复活装置定期排放的废液一般都是通过专业的危废处理公司通过焚烧炉焚烧处置。

5. 捕集设备

捕集设备分为动设备、静设备、配套设备三部分组成，标准中给出了较详细的描述：

——**静设备**主要包括塔设备（预处理塔、吸收塔、解吸塔）、槽（地下槽、吸收液储槽、洗涤液储槽、碱液储槽等）、罐（闪蒸罐、除盐水罐等）、换热器（贫富液换热器、贫液冷却器等）；

——**动设备**包括风机、泵（贫液泵、富液泵、洗涤泵、回流泵、闪蒸汽压缩机等）；

——**配套系统**包括排放气旁路、管道、监测、电气、控制及安全装置。

对于设备的要求，标准中分为塔设备、罐和槽、换热器、其他设备给出了较详细的要求。重点关注设备应符合相关标准的要求，并满足工艺设计运行的需要，在能源消耗方面应尽可能采用节能措施，标准中推荐了吸收塔中部的级间冷却器、闪蒸罐等内容。

6. 安全和职业卫生

CO_2 捕集工艺安全中涉及到特种设备的使用、液氨制冷剂的使用，有限空间的作业等，标准中均给出了明确的要求，职业卫生方面，标准中从工作人员的防护、设备管道的绝热设计、工作场所的噪声等方面进行了规定。

7. 捕集效果的评价

捕集效果的评价标准中从 CO_2 的捕集率、捕集系统的能耗来表示，其中捕集系统能耗中再生热耗占主要部分，所以标准中给出了相应的计算公式，其中捕集率和捕集能耗基本参考 GB/T 51316-2018《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》标准的描述。

8. 实际应用

新疆敦华绿碳技术股份有限公司在 2016 年采用化学吸收法捕集 CO_2 工艺建成投产 10 万吨/年弛放气捕集液化项目，平稳运行 8 年，2020 年 5 月又在南疆成功建设第二条装置并投产运行。同时将相关技术经验推广到水泥行业（海螺集团白马山水泥厂）、钢铁行业（新疆八钢集团）、发电行业（陕西国华锦界电厂）的生产企业低浓度碳捕集过程中，在相应的领域也得到了很好的推广应用。新疆敦华对于低浓度的碳捕集具体操作情况见附件中的表所示。

9. 附录

标准的附录 A 中给出了典型的化学吸收法捕集工程的布置方式。

八、有关的现行法律、法规和强制性国家标准的关系

与有关的现行法律、法规和强制性国家标准没有冲突。

九、重大分歧意见的处理经过和依据

无重大分歧意见。征求意见稿在网上公开征求意见，意见的处理见《标准征求意见汇总处理表》。

十、贯彻标准的要求和措施建议

建议尽快发布实施本标准。建议标准实施后组织标准宣贯，使相关单位了解标准内容，促进标准顺利实施。

十一、 废止现行有关标准的建议

本标准为首次制定。无废止现行有关标准的建议。

十二、 标准水平分析

本次制定标准参考 GB/T 51316-2018《烟气二氧化碳捕集纯化工程设计标准》，并根据国内已经工业化运行的实际经验进行总结归纳，对相关的技术内容给出了明确的要求，起到了对技术的引领和推广作用。综合分析，标准达到国内先进水平。

附件

新疆敦华捕集工艺相关统计数据

序号	项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	排放气压力/ kPa(表压）	50	30	-0.1	-0.08	0	-0.05	2	-0.08	-0.08	0
2	排放气温度/℃	45	25-30	110	140	145	65	130	150	140	140
3	排放气中颗粒物浓度(mg/Nm^3)	0	0	4	3	3	5	9	1	4	2
4	排放气中 NOx 浓度(mg/Nm^3)	0	0	85	42	35	30	40	30	38	36
5	排放气中 SO_2 浓度(mg/Nm^3)	0	0	10	14	15	10	20	5	12	17
6	排放气中 CO_2 浓度(%)	45-50%	45-50%	10-12%	8-10%	6-8%	12-15%	18-20%	3-5%	8-10%	6-8%
7	吸收塔的吸收温度/℃	≯40	≯40	40-45	40-45	40-45	40-45	40-45	40-45	40-45	40-45
8	吸收塔的吸收压力/ kPa(表压）	50	30	10	10	8	10	9	10	10	10
9	解析温度/℃	105-107	102-107	103-107	106-108	106-108	106-110	103-106	108-110	106-108	106-110
10	解吸塔塔顶压力/ kPa(表压）	10	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40	30-40
11	解吸后 CO_2 浓度（以干基计）/%	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99	> 99
12	CO_2 捕集率/%	> 95	> 95	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90	> 90
13	系统捕集能耗（GJ/tCO_2）	2.45	2.485	2.65	2.85	2.95	2.6	2.55	3.05	2.95	2.85
14	吸收剂再生能耗（GJ/tCO_2）	2.2	2.235	2.4	2.6	2.7	2.35	2.3	2.8	2.7	2.6
15	吸收剂损耗(kg/tCO_2)	0.05	0.04	1	0.8	1	0.6	0.6	0.5	0.6	0.6