

## Engineering Achievements

## 年 15 万吨规模燃煤电厂燃烧后碳捕集示范工程

崔青汝<sup>a</sup>, 赵瑞<sup>a</sup>, 王天堃<sup>b</sup>, 张帅<sup>a</sup>, 黄艳<sup>c</sup>, 顾永正<sup>b</sup>, 徐冬<sup>a</sup><sup>a</sup> CHN Energy New Energy Technology Research Institute Co., Ltd., Beijing 100025, China<sup>b</sup> GD Power Development Co., Ltd., Beijing 100101, China<sup>c</sup> CHN Energy Jinjie Energy Co., Ltd., Yulin 718001, China

## 1. 引言

气候变化是当今世界面临的最严峻挑战之一，目前我国年二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放总量达 100 多亿吨，占全球第一。燃煤在为我国经济发展提供助力的同时，也渐渐成为我国实现“碳达峰”和“碳中和”目标的主要挑战。在此背景下，煤炭低碳利用是未来发展的必然趋势，探索在煤炭利用尤其是燃煤发电过程中 CO<sub>2</sub> 的大规模减排新途径对我国实现碳中和目标至关重要。

碳捕集、利用与封存（CCUS）是将 CO<sub>2</sub> 从排放源中分离后直接加以利用或封存，以实现 CO<sub>2</sub> 减排的技术过程 [1–2]。作为目前唯一能够实现化石能源大规模低碳化利用的减排技术，CCUS 是我国实现 2060 年碳中和目标技术组合的重要构成部分。主流的碳捕集工艺可分为三类：燃烧前、燃烧中（富氧燃烧捕集）和燃烧后捕集。与燃烧前捕集和富氧燃烧捕集相比，燃烧后捕集技术的捕集效率高、适应性好、应用广泛、技术较为成熟，是现阶段实现 CO<sub>2</sub> 大规模捕集的重要途径。

在燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集技术中，化学吸收法主要采用碱性胺基吸收剂吸收分离烟气中的 CO<sub>2</sub>，因其烟气适应性好、捕集效率高、技术相对成熟，是最具大规模捕集 CO<sub>2</sub> 潜力的技术路线之一 [3]。加拿大边界大坝（Boundary Dam）项目是燃煤电厂百万吨/年 CO<sub>2</sub> 捕集示范工程（2014 年投

入运行），采用 SO<sub>2</sub>-CO<sub>2</sub> 联合捕集工艺，高浓度 CO<sub>2</sub> 用于 70 km 外油田驱油，每吨 CO<sub>2</sub> 的捕集成本约 105 美元。美国 Petra Nova 项目设计碳捕集能力为每年 140 万吨（2017 年投入运行），采用化学吸收法进行捕集，高浓度 CO<sub>2</sub> 用于驱油，每吨 CO<sub>2</sub> 的捕集成本约为 55~60 美元。其受疫情影响已停运，且整体运行成本偏高，难以大规模推广。

年 15 万吨规模燃煤电厂燃烧后碳捕集示范工程从吸收剂选择、工艺优化、设备强化等多方面开展研究，创新集成了低能耗高效节能工艺，研制了针对燃煤电厂的低能耗成套碳捕集装置，并实现工业化运行。

## 2. 总体概况

为加快 CCUS 技术的商业推广应用，仍需持续降低 CO<sub>2</sub> 捕集能耗。如何控制和减少碳排放已成为制约燃煤发电，乃至整个电力行业可持续发展的瓶颈之一 [4]。针对燃煤电厂烟气流量大、烟气中 CO<sub>2</sub> 低分压、烟气成分复杂、含有 SO<sub>2</sub> 和 NO<sub>x</sub> 酸性气体等特点，结合碳捕集高效率、低能耗、低成本的设计理念，创新性地开展了对燃煤电厂燃烧后碳捕集工艺的优化研究，建设了年捕集能力高达 15 万吨 CO<sub>2</sub> 的燃煤电厂燃烧后碳捕集示范工程（图 1），这是目前已经建成的国内最大规模的燃煤电厂燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕集与封存/驱油全流程示范工程。



图1 年15万吨规模碳捕集示范工程全景。

该碳捕集工程建设在国能锦界能源有限责任公司，依托1号600 MW亚临界机组，烟气取自经过超低排放改造的脱硫后尾气，每小时可捕集CO<sub>2</sub> 18.75 t，运行调节稳定，碳捕集工程在50%~110%范围内平稳运行。该工程是国家能源集团联合国内有关企业、高校、科研单位等优势力量，以项目为依托、协同创新、产学研用的重大碳减排示范工程。项目从2016年开始，历经方案论证、技术条件编制、小型试验验证、新型设备研制、工艺包开发和示范工程建设，实现整体装置的95%自主化。开发并研制出适应于燃煤电厂烟气特点的低能耗成套碳捕集装置；结合当地实际情况，开展基于CO<sub>2</sub>捕集、运输、销售、利用、封存/驱油全产业链的综合性整体分析，构建面向大型热力发电厂的碳减排综合解决方案。

### 3. 工程技术解读

#### 3.1. 集成高效节能工艺

针对燃煤烟气CO<sub>2</sub>浓度低，烟气总量大、湿度高、成分复杂等特点，为降低能耗，提高系统的经济性，本项目创新开发了“级间冷却+分级解吸+MVR（机械蒸汽再压缩工艺）闪蒸”的高效节能工艺（图2），从吸收-再生-节能三个维度同步提高整体系统的技术经济性。吸收塔内部的级间冷却工艺充分考虑吸收剂的最佳吸收温度，控制吸收塔温度分布提高吸收效率；再生塔分流解吸工艺通过能量匹配及梯级利用，确定合适分流比例，降低再生能耗；MVR真空闪蒸回收热贫液蒸汽，进一步耦合燃煤电厂应用场景，形成集成化节能工艺，充分利用成套装置系统内部再生气余热以及电厂余热，有效降低系统再生能耗。通过新型低能耗吸收剂和节能工艺的共同作用，相比乙二醇（MEA）的吸收体系，可降低能耗40%，形成了适用于我国燃煤电厂烟气CO<sub>2</sub>高效、低能耗捕集的新技术体系。

烟气自国能锦界能源有限责任公司1号机脱硫后出口烟道抽取，进入水洗塔内洗涤降温和深度脱硫，而后进入吸收塔，塔内设置级间冷却工艺。新型吸收剂吸收烟气中的CO<sub>2</sub>后成为富液，富液从吸收塔塔底流出后分为两股，一股进入贫富液换热器，热量回收后进入解吸塔，一股直接进入解吸塔，在再沸器的加热作用下解吸出CO<sub>2</sub>，解吸后的富液变为贫液，从解吸塔塔底流出，解吸后的贫液进

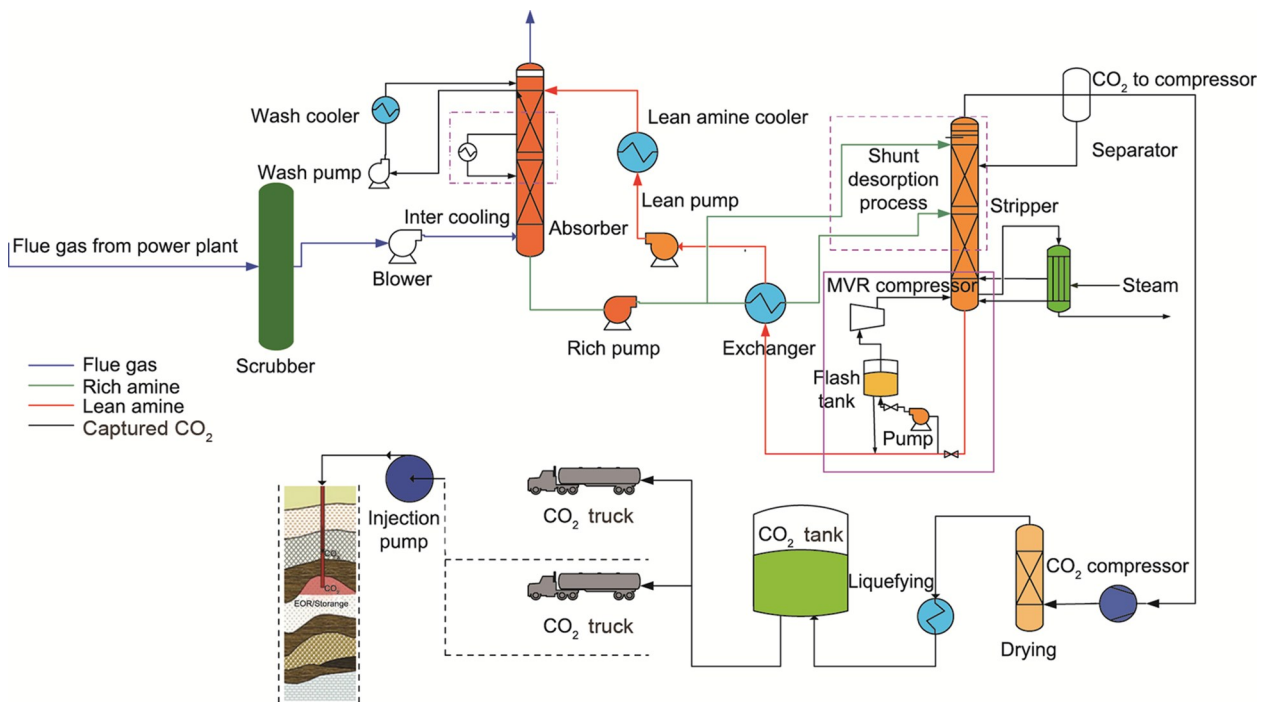


图2. 捕集装置采用的高效节能工艺。

入闪蒸罐进行闪蒸。解吸出的 $\text{CO}_2$ 经气液分离器后得到纯度99.5%（干气）以上的 $\text{CO}_2$ 产品气，进入压缩等后序工段进一步处理。压缩机出口 $\text{CO}_2$ 压力为2.5 MPa（表压），温度为40℃。缩后的 $\text{CO}_2$ 气体进入提纯塔进行脱水干燥。经干燥处理后的 $\text{CO}_2$ 气体进入 $\text{CO}_2$ 冷凝器和过热器，液化降温制冷至-20℃以下，完全液化后送至 $\text{CO}_2$ 球罐进行储存。

### 3.2. 新型吸收剂及回收

本工程采用新型有机复合胺吸收剂。与常规MEA吸收剂相比，增加了多氨基胺及空间位阻胺，形成吸收容量大的复合胺（图3）。通过分子设计和功能基团匹配保证复合胺的吸收能力、解吸效果和运行稳定性，同时针对性开展吸收剂回收及再生技术。吸收剂的挥发特性直接影响运行成本，通过吸收剂复配和精细化调控实现吸收剂的低损耗运行。由于燃煤烟气中含有的少量杂质气体（ $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_x$ 、 $\text{O}_2$ 等）会同有机胺发生副反应，长周期运行后导致胺溶液中热稳定性盐（HSS）的生成和富集，进一步引起溶液吸收能力的下降，为了使系统高效运行，胺溶液中的HSS水平应控制在胺浓度的3%以下。

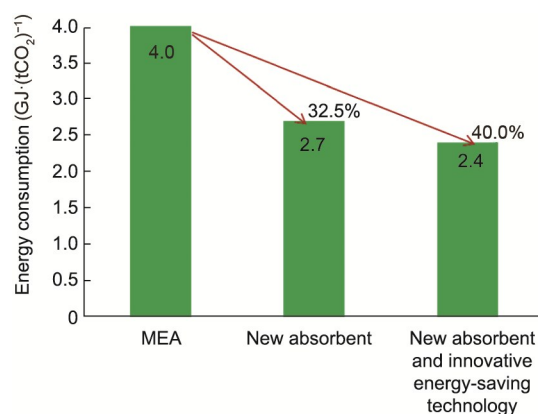


图3. 捕集装置能耗变化情况。

### 3.3. 碳捕集成套装备研制

本工程中成功研制了以塔器、换热设备、动力装置、压缩液化装置、干燥净化为主体的碳捕集成套装备，并成功应用到目前国内最大的燃煤电厂 $\text{CO}_2$ 捕集示范工程中，实现了低浓度 $\text{CO}_2$ 的高效率捕集，获得了纯度达到99.97%以上的液态 $\text{CO}_2$ 。碳捕集成套装备充分结合燃煤电厂的特点，系统性考虑上下游的匹配，提升了整套装置的性能。

#### 3.3.1. 高效率塔器

针对燃煤烟气中 $\text{CO}_2$ 浓度低、分压低的实际条件，采用特殊型式的分离元件及塔内件，成功研制适用于燃煤烟

气碳捕集的新型高效水洗塔、吸收塔和再生塔三塔设备，塔内主要由规整填料、支撑板、支撑梁、液体初始分布器、液体收集器、液体两级再分布器和气体分布器等组成。通过高效分离塔内件，构建均布系统，提升气液接触面积和停留时间，降低压降，提高吸收效率，降低能耗。塔内首次采用改性聚丙烯塑料填料（图4），通过化学改性提升塑料填料的吸收容量和亲水性能，在满足塔器要求的前提下，降低塔体总重量和总投资。通过再收集-再分布的设计，提高化学吸收溶剂的吸收效率和装置大型化的操作稳定性，降低能耗和溶剂损耗量。

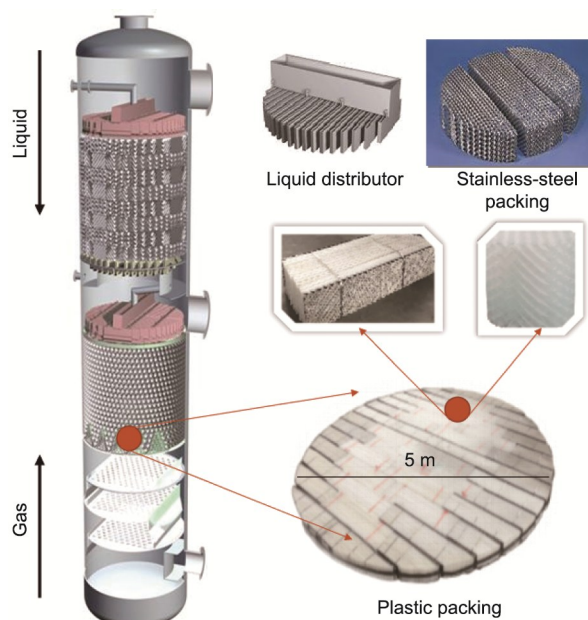


图4. 塔器内部结构及主要塔内件。

#### 3.3.2. 节能换热装置

针对化学吸收系统低品位热难以利用的问题，自主研发高效低端差全焊接板式换热器。该换热器主要由换热芯体、上盖板、下盖板、折流板、密封垫及支座等组成，构成错流通道（图5），具有设备紧凑、可快速拆卸、安装空间小且安装方式灵活等特点。板式换热器传热面积大且传热效果好，在化工领域应用广范，与传统列管式换热器相比，有效降低了设备换热端差，平均可下降10℃，使整体热能回收效率提升0.5%，同时换热器材料消耗可降低约50%。

采用新型降膜再沸器（图6），吸收剂在降膜再沸器中停留时间短，有利于缓解吸收剂的热降解，传热系数大，蒸发过程在再沸器内部完成，无需塔釜空间完成气液分离。操作弹性大，单程蒸发强度大，50%流量负荷运行时仍可以保持较高换热系数。设备结构紧凑，一次蒸发量

可达30%，相比常规的卧式再沸器效率更高。

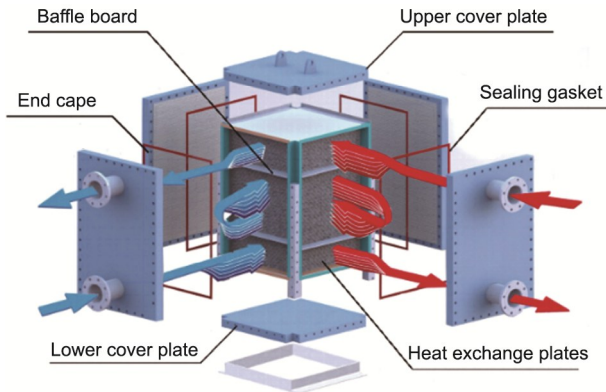


图5. 高效低端差换热器。

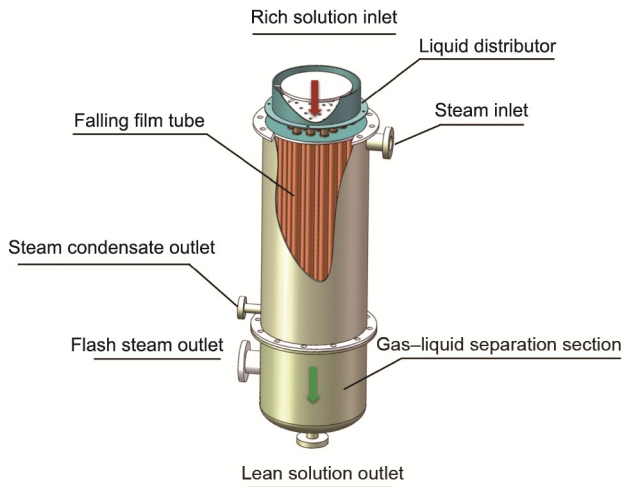


图6. 管式降膜再沸器。

### 3.3.3. 压缩装置

本工程采用调节灵活的螺杆式CO<sub>2</sub>压缩装置，是目前为止单列最大的CO<sub>2</sub>压缩机。充分结合CO<sub>2</sub>工质的热力特性及碳捕集示范工程的运行工况，开发了非对称圆弧型线

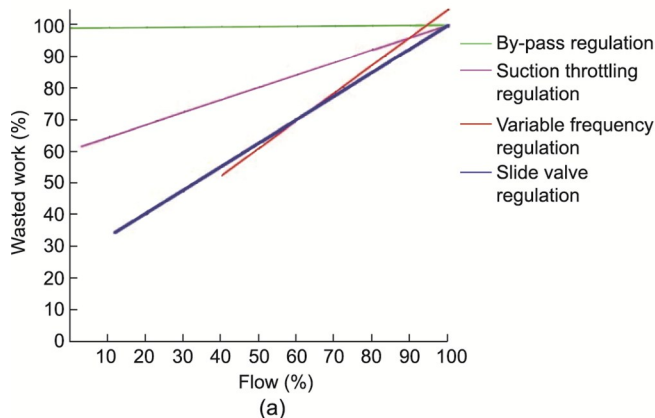
[图7 (a)]。CO<sub>2</sub>型线采用5:7齿。阴、阳转子直径相当，承载能力高，适合CO<sub>2</sub>压差大的工况。压缩装置分为低压级和高压级，提高了阴转子的承载能力，解决了CO<sub>2</sub>压缩机大压差工况转子的刚性问题。该压缩装置因具有接触线短、啮合平稳、密封性好、效率高的优点，从而解决了自然工质的效率问题。采用滑阀调节，调节范围为15%~100%且能耗较低，通过设置两列50%的压缩机[图7 (b)]，做到节能高效灵活稳定。

### 3.3.4. 干燥系统

本工程采用闭式循环脱水等压干燥系统（图8），干燥系统的外供再生气可反复利用，不外排蒸汽，大幅减少了蒸汽消耗。干燥系统分为CO<sub>2</sub>气体的干燥脱水、干燥剂加热再生、干燥剂冷却等过程，经过系统优化及程序化控制，干燥单元系统采用等压变温流程（TSA），可实现干燥剂在线干燥-在线再生，并连续稳定运行。干燥单元采用先进智能化控制，自动化程度高，对流量、温度、压力都进行检测。在设计 and 制造阶段，充分考虑设备材质、结构特性、仪表安全等方面的因素，实现CO<sub>2</sub>气体可精确监控，确保测量的准确性。

### 3.4. 建立了实现CO<sub>2</sub>捕集、运输、销售、利用、封存/驱油的全产业链模式

本工程实现了燃煤电厂捕集、运输、销售、利用、封存/驱油的全产业链运行。运输采用罐车外送，每车运输20 t。结合当地CO<sub>2</sub>市场的实际情况，将捕集到的CO<sub>2</sub>全部消纳利用，利用途径主要包括三部分：一部分用于附近油田驱油，距离约200~300 km；一部分用于化工利用领域，制备小苏打（碳酸氢钠），距离约200 km；还可以用于制备高值化工品（碳酸二甲酯和丙二醇等），距离约50 km。运输距离的远近直接影响CO<sub>2</sub>的成本，运输成本基本可按照每吨CO<sub>2</sub> 0.1元·km<sup>-1</sup>，每吨CO<sub>2</sub>的捕集成本约为250~



(b)

图7. 螺杆式两级压缩机设备及调节能力对比。



图8. 干燥系统。

280元，运输费用充分考虑利用端距离远近，约按每吨CO<sub>2</sub> 200元。每吨CO<sub>2</sub>的销售价格大于450~480元时具有可持续运行基础，因此围绕碳捕集装置区域，建立CO<sub>2</sub>全链条的循环利用途径将具有明显的带动作用。进一步围绕CO<sub>2</sub>捕集装置区域谋划CO<sub>2</sub>全链条循环利用的产业布局，是未来CCUS产业发展应该考虑的系统性问题。

#### 4. 结论

本项目采用新一代低能耗的化学吸收CO<sub>2</sub>捕集技术，捕集效率高、运行可靠，为燃煤电厂CO<sub>2</sub>大规模减排提供技术支撑。碳捕集装置自运行以来，展现出良好的技术先进性、运行可靠性和低能耗特性，引起了社会广泛关注和强烈反响，起到了良好的示范引领作用。碳捕集示范装置为燃煤电厂量身定制的减碳路径、设计的技术路线和研制的成套设备，为规模化捕集提供系统方案。

围绕碳捕集装置中新技术和设备的研究应用，未来碳捕集装置的智能化控制、与燃煤电厂集成化设计、整体低

能耗运行等技术仍需进一步的开发及示范。针对燃煤机组，最大限度地降低吸收剂的损耗也是降低运行成本的有效措施。

建立规模化的碳循环体系是未来实现碳中和的重要方向，随着示范工程的长期运行，燃煤电厂碳减排的重点将转移至CO<sub>2</sub>的运输、利用/封存阶段，运输距离与CO<sub>2</sub>的成本密切相关，应探索近距离甚至就地消纳利用方式，以提升碳循环整体的经济性。

仍需大力拓展CO<sub>2</sub>资源化利用、能源化利用方式，进一步与化工行业、建材行业、生物固碳等行业的跨界合作，形成多途径、多产品、多形式且与捕集规模相匹配的利用方式。

#### 致谢

本项目得到国家重点研发计划项目(2017YFB0603305)支持。

#### References

- [1] Gao W, Liang S, Wang R, Jiang Q, Zhang Yu, Zheng Q, et al. Industrial carbon dioxide capture and utilization: state of the art and future challenges. *Chem Soc Rev* 2020;49(23):8584–686.
- [2] Eide LI, Batum M, Dixon T, Elamin Z, Graue A, Hagen S, et al. Enabling large-scale carbon capture, utilisation, and storage (CCUS) using offshore carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) infrastructure developments—a review. *Energies* 2019; 12(10): 1945.
- [3] Dumée L, Scholes C, Stevens G, Kentish S. Purification of aqueous amine solvents used in post combustion CO<sub>2</sub> capture: a review. *Int J Greenhouse Gas Control* 2012;10:443–55.
- [4] Zhang X. Application prospect of CCUS in China under the target of carbon neutrality. *China Sustainability Trib* 2020;12:22–4. Chinese.