



BHP



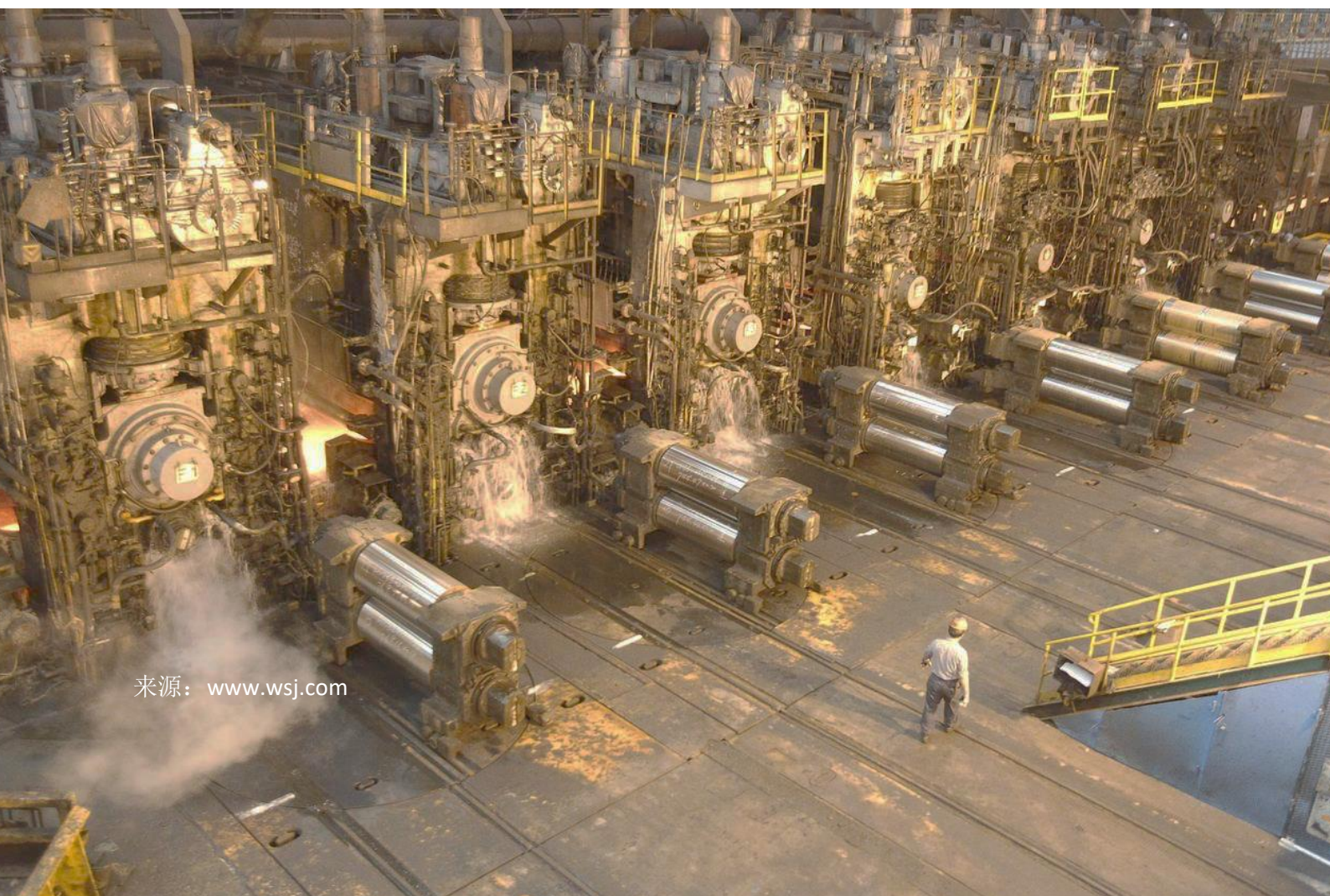
中英(广东)CCUS中心
UK-China (Guangdong) CCUS Centre



UNIVERSITY OF EDINBURGH
Business School

中国钢铁行业碳捕集，利用与封存

中国钢铁厂碳捕集 封存预留研究



来源: www.wsj.com





BHP



中英（广东）CCUS 中心
UK-China (Guangdong) CCUS Centre



UNIVERSITY OF EDINBURGH
Business School

中国钢铁行业碳捕集，利用与封存

中国钢铁厂碳捕集封存预留研究

2018 年 11 月

任利华，贾智刚，刘牧心，王莉，陈晓露

中英（广东）CCUS 中心，中国

梁希，MUSLEMANI Hasan，ASCUI Francisco，江梦菲，林千果

爱丁堡大学商学院，英国

GIBBINS Jon

英国碳捕集与封存研究中心&谢菲尔德大学，英国



目录

免责声明.....	III
致谢.....	IV
缩略词.....	V
1. 执行摘要.....	1
2. 绪论.....	3
3. “碳捕集预留”概念的演变	5
4. 钢铁厂碳捕集和封存预留（CCS-ready）技术和设计要求	7
4.1. 选址考虑	7
4.2. 不同烟气的碳捕集技术选择	8
4.3. 捕集预留装置的基本要求	10
5. 50 万吨 CO ₂ 捕集规模的假设碳捕集预留项目案例研究.....	15
5.1. 技术假设和研究方法	15
5.2. 捕集预留研究的假设	16
5.3. 模拟结果	20
5.4. CO ₂ 捕集、压缩概念设计	24
5.5. 钢铁厂设计中的捕集预留要求	30
6. 结论.....	36
参考文献.....	38

图

图 1. 钢铁行业负减排技术边际减排成本曲线.....	3
图 2. 中国大型钢铁厂和潜在封存地位置分布.....	8
图 3. 钢铁厂典型 CO ₂ 排放源.....	9
图 4. 捕集预留假设案例的研究方法.....	16
图 5. 典型胺基吸收法工艺流程图.....	18
图 6. 典型胺基吸收工艺的假设设计条件.....	19
图 7. 二氧化碳捕集、压缩装置及公用工程设施初步布置.....	26
图 8. 余热在 CCS 中的综合利用.....	28

表

表 1. 中国大型钢铁厂附近的潜在 EOR 封存地.....	7
表 2. 不同 CO ₂ 排放源的捕集技术选项.....	11
表 3. 典型的气体入口条件.....	17
表 4. 典型热风炉入口烟气条件和 CO ₂ 捕集能力假设.....	17
表 5. 主要工艺物流的模拟结果.....	22
表 6. 塔计算准则.....	23
表 7. 吸收塔参数.....	23
表 8. 解吸塔参数.....	23
表 9. 换热器的模拟输出参数.....	24
表 10. 二氧化碳捕获初步设备清单.....	24
表 11. 二氧化碳压缩初步设备清单.....	25
表 12. 公用工程消耗.....	26
表 13. 钢铁工业副产品气体.....	27
表 14. 中国钢铁工业不同品质余热回收利用.....	28
表 15. 压缩机和汽轮机特性计算.....	29
表 16. 汽轮机规格.....	29

免责声明

除另有声明外，本刊物版权归爱丁堡大学商学院和中英（广东）CCUS 中心所有。除法律允许的任何用途外，本出版物的任何部分未经双方书面许可不得转载。

其他事宜可咨询 ccus@business-school.ed.ac.uk

中英（广东）CCUS 中心和爱丁堡大学商学院（University of Edinburgh Business School）参与本报告的研究人员尽量使本报告中出现的信息精准。但是，他们不能保证本报告中的信息完全可靠、准确或完整。因此，在进行投资或商业决策时，不应完全依赖本出版物中的信息。爱丁堡大学商学院（University of Edinburgh Business School）不对本出版物中提到的任何外部或第三方互联网网站关于本报告链接的持久性或准确性负责，也不保证这些网站上的任何内容是准确或合适的。爱丁堡大学商学院（University of Edinburgh Business School）及其员工和顾问在允许的最大范围内，对于使用或依赖本出版物中的信息，包括根据本出版物提供的信息做出的任何商业或投资决定，不承担任何责任（包括过失）。

致谢

我们感谢必和必拓工业二氧化碳捕集项目的资助，特别感谢 Graham Winkelman 先生和欧阳军先生的大力支持。感谢来自世界钢铁协会的 Andrew Purvis 先生，英国碳捕集与封存研究中心（UKCSCRC）Bruce Adderley 先生，和来自 IEA 清洁煤中心的 Toby Lockwood 先生提出的前期建议和提供的宝贵信息和意见。Philip Curry 先生对这份报告进行了校对，在此一并表示感谢。

引用格式

Ren, L., Jia, Z., Liang, X., Liu, M., Muslemani, H., Ascui, F., Lin, Q., Jiang, M., Gibbins, J., Wang, L., and Chen, X. (2018). Considerations for Making Steel Plants CCS-Ready in China. Working Paper 4.9 for the BHP Industrial CCS Project ‘Unlocking the Potential of CCUS for Steel Production in China’. North China Electric Power University, UK-China (Guangdong) CCUS Centre and The University of Edinburgh, Edinburgh.

缩略词

ADB	Asian Development Bank 亚洲开发银行
ASPEN Plus	Advanced System for Process Engineering 过程工程的先进系统
BF-BOF	Blast Furnace – Basic Oxygen Furnace 高炉 - 碱性氧气炉
BFG	Blast Furnace Gas 高炉煤气
BoP	Balance of Plant 公用辅助设施
CAPEX	Capital Expenditure 资本支出
CAPPCO	Chinese Advance Power Plant Carbon Capture Option 中国先进电厂碳捕集选项
CCR	Carbon Capture Readiness 碳捕集预留
CCS	Carbon Capture and Storage 碳捕集和封存
CCSR	Carbon Capture and Storage Readiness 碳捕集和封存预留
CCUS	Carbon Capture Utilisation and Storage 碳捕集、利用和封存
CO	Carbon Monoxide 一氧化碳
CO ₂	Carbon Dioxide 二氧化碳
CO ₂ e	Carbon Dioxide Equivalent 二氧化碳当量
COG	Coke Oven Gas 焦炉煤气
DCS	Distributed Control System 分布式控制系统
DECC	Department of Energy and Climate Change 英国能源与气候变化部;
DRI	Direct Reduced Iron 直接还原铁
EAF	Electric Arc Furnace 电弧炉
EOR	Enhanced Oil Recovery 提高石油采收率
FEED	Front-End Engineering Design 前端工程设计
FGD	Flue Gas Desulphurisation 烟气脱硫
GCCSI	Global CCS Institute 全球碳捕集与封存研究院
GDCCUSC	UK-China (Guangdong) CCUS Centre 中英（广东）CCUS 中心
GIS	Geographic Information System 地理信息系统
HAZOP	Hazard and Operability Study 危险及可操作性分析
HMB	Heat & Mass Balance 热量和物料平衡
ID	Induced-draft 引风机
IGCC	Integrated Gasification Combined Cycle 整体煤气化联合循环发电系统
LP	Low Pressure 低压

LDG	Linz-Donawitz Gas 转炉煤气
MAC	Marginal Abatement Cost 边际减排成本
MCC	Motor Control Centre 电机控制中心
MEA	Monoethanolamine 单乙醇胺
MDEA	N-Methyldiethanolamine N-甲基二乙醇胺
MVR	Mechanical Vapor Recompression 蒸汽机械再压缩
NO _x	Nitrogen Oxides 氮氧化物
NRDC	National Resources Defense Council 自然资源保护协会
OPEX	Operational Expenditure 运行成本
PSA	Pressure Swing Adsorption 变压吸附
R&D	Research & Development 研发
SO _x	Sulphur Oxides 硫氧化物
UKCCSRC	UK CCS Research Centre 英国碳捕集与封存研究中心
ULCOS	Ultra-Low CO ₂ Steel Making 超低二氧化碳炼钢工艺研究项目
WHB	Waste Heat Boiler 余热锅炉
WWT	Waste Water Treatment 废水处理

1. 执行摘要

- 钢铁行业是二氧化碳排放的最大工业来源之一，占全球工业温室气体直接排放总量的约 28%。自 2012 年以来，中国钢铁产量已占全球钢铁总产量的大约一半，因此探索中国钢铁行业碳减排的未来之路至关重要。其中一个重要的减排技术选项即为碳捕集和封存（CCS）。
- “CCS 预留（CCSR）”或“CO₂ 捕集预留（CCR）”是一个设计概念，需要预先进进行少量前期投入，使其具备能在未来进行 CCS 改造的潜力。如此，捕集预留能够规避钢铁行业的“碳锁定效应”（注：指钢铁厂无法为后期的碳捕集技术改造提供足够的支持条件，从而陷入被动困境）。本报告概述了相关的关键技术和设计要求，确保钢铁厂做到捕集准备就绪。
- 本报告通过研究一个假设的案例，为一个年捕集 50 万吨 CO₂ 规模的项目开发 CCR 概念设计。研究假定使用通用的非专利胺吸收剂（30wt%MEA），以 90% 的捕集效率从钢铁厂热风炉尾气中捕集二氧化碳，并以此作为基准案例进行碳捕集预留的研究。
- CCR 总体要求包括但不限于：1）**钢铁厂地理位置选择**：在捕集装置建成后，捕集的 CO₂ 需要被输送出去用于地质封存和/或提高石油采收率，因此，要确保其位置靠近封存地，并消除健康和安全方面的隐患；2）**捕集技术选择**：钢铁厂 CCR 不应局限于单一的技术路线，而应考虑到其未来采用不同的碳捕集技术方案的需求；3）确保有**足够的场地**来容纳新增的 CO₂ 捕集设备及相应接口，以及扩建配套设施（BoP）以满足捕集装置新增公用工程设施（如冷却水、辅助配电等）的需求。
- 本研究表明，中国的 142 个年产量超过一百万吨的钢铁厂中有 51 个位于潜在 CO₂-EOR 封存地的 200 公里半径范围内。
- 对于本假设案例项目的 CCR 设计，需要在建厂时预留 4000 平方米（100 米×40 米）的矩形面积，以便将来容纳预处理单元、胺法捕集单元、CO₂ 压缩单元（便于 CO₂ 运输和储存）的设备，以及包括控制中心、分析化验室和配电室等的综合楼。公用工程供应设施可能需要额外约 1200 平方米（30 米×40 米）的场地。
- 工艺冷却设备总共需要大约 12500 t/h 的**冷却水**（假设供水温度和回水温度分别

为 32℃/40℃）。实际所需的冷却水量可能会因当地气象条件以及循环水冷却系统类型而变化。

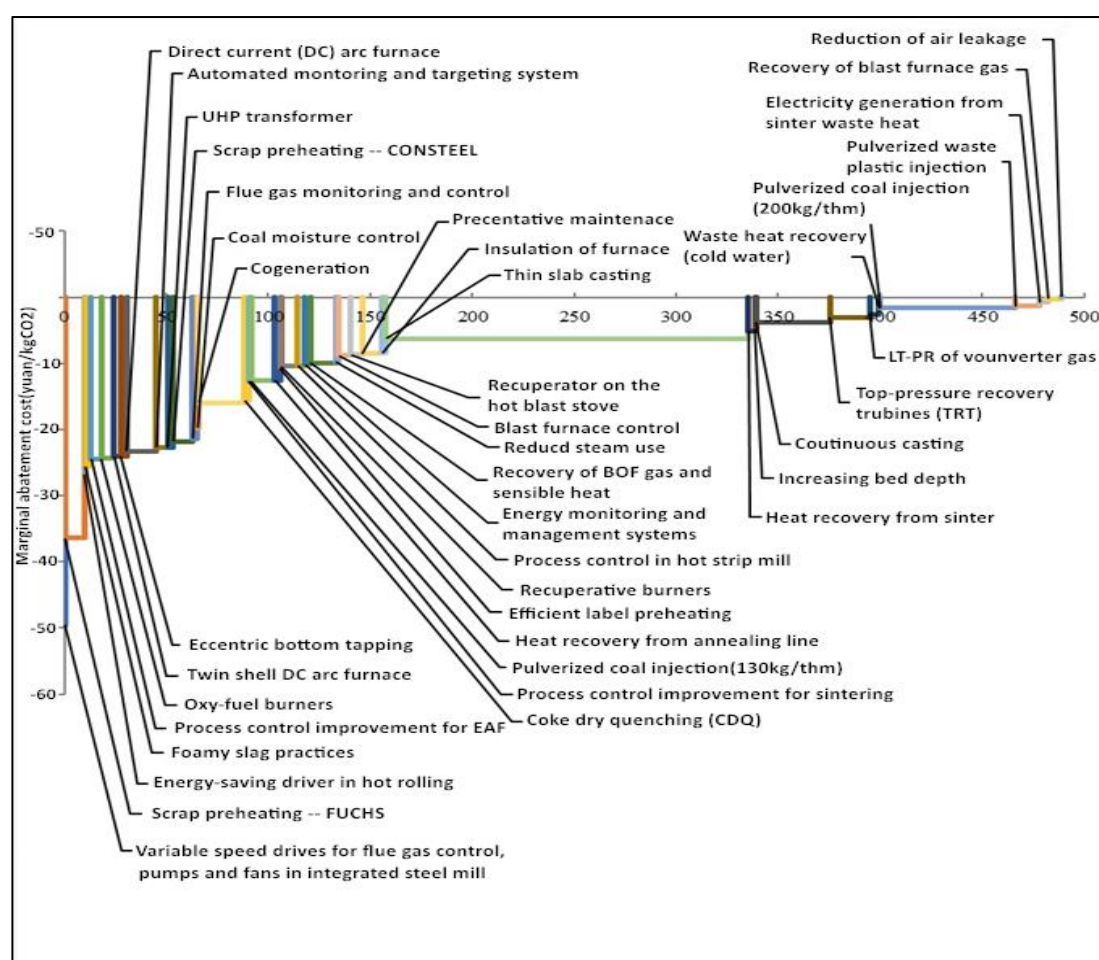
- 预计在未来进行捕集改造时，需要对**废水处理厂**进行改造和补充，使工厂能够处理并安全处置来自捕集设备的废水。

关键词: 钢铁，CCS，捕集预留，捕集封存预留，中国

2. 绪论

钢铁行业温室气体排放占全球工业温室气体排放的 28%（IEAGHG, 2018）。自 2012 年起，中国钢铁产量约为全球钢铁产量的二分之一（World Steel Association, 2018）。这使得探索如何在钢铁行业（特别是在中国钢铁行业）实行碳减排变得至关重要。高炉路线炼钢在中国钢铁行业占主导地位，其平均二氧化碳（CO₂）排放量约为 2-3 吨 CO₂/吨钢（ULCOS, 2013）¹。

图 1. 钢铁行业负减排技术边际减排成本曲线



注：y 轴单位：元/kgCO₂；x 轴单位：kgCO₂/吨钢

来源：Lu et al., 2018

¹根据采用的生产技术和路线，该数值波动区间为 0.4~2.5 吨 CO₂/吨钢。根据 IPCC（2017）报告，不同国家间该行业的排放波动较大，巴西的平均碳排放约为 1.255 吨 CO₂/吨钢，韩国和墨西哥的平均碳排放约为 1.65 吨 CO₂/吨钢，美国平均碳排放约为 2.95 吨 CO₂/吨钢，中国和印度的平均碳排放约为 3.1~3.85 吨 CO₂/吨钢。

目前已有许多适用于钢铁厂的低碳技术和工厂升级方案。图 1 表明，应用所有潜在负（即降低成本或“无成本”）边际减排成本（MAC）技术，每生产 1 吨粗钢能够减排 0.45 吨 CO₂。换言之，应用所有这些技术仅能减排低于 20-25% 的炼钢过程中产生的 CO₂。碳捕集和封存（CCS）是能够减少其余 75-80% 碳排放的少数方案之一。但由于该技术的昂贵正减排成本，很难即时开展大规模 CCS 部署。

但是随着时间推移，运用较低 MAC 技术减排的机会将趋于减少，在更严格的排放绩效标准或者更高碳价的情景下，将激励需要减排的企业使用较高减排成本的技术。由于目前建成的钢铁厂可运行 25 到 40 年，因此，在钢铁厂进行碳捕集和封存预留（CCSR）² 能够以较低的成本确保钢铁厂可以在未来进行 CCS 改造，以实现温室气体的深度减排。

本报告在下一章探讨了捕集预留概念的演变历程，包括该概念在中国电力行业的应用。第四章概述了 CCSR 的设计考虑，包括中国钢铁厂的封存方案或“封存准备”。第五章对一个年捕集 50 万吨 CO₂ 规模的假设 CCSR 项目案例进行了研究分析，并在第六章中进行讨论并总结。

² 术语 CCSR，在本文有时被称为 CCR（碳捕集预留），是在电力或工业装置的背景下使用的，并且指的是，经管理部门同意，在授予时认可那些发电站/工业装置在未来进行 CCS 改造时技术上是可行的。

3. “碳捕集预留”概念的演变

吉宾斯（Gibbins, 2004）将捕集预留定义为“对一个工厂的设计使得其可以在未来某个时间增加二氧化碳捕集设备且对使用年限经济性能的影响最小”。除了技术设计之外，需要实际空间来容纳所需的额外设备是任何捕集预留方案中的关键因素。这一概念在随后的几年中得到了进一步发展（IEAGHG, 2007; Gibbins et al., 2006）。

这个想法逐渐受到了一些环保组织的推崇。2004 年 12 月，美国的环境组织自然资源保护协会（NRDC）在中国清洁能源项目列出了“中国以煤气化为基础的多联产项目开展碳捕集预留”（电力与化工品联产）作为其国家积极行动之一（NRDC, 2004）。威尔逊和吉宾斯（2005）在 2005 年初提出了一个更广泛的“捕集预留”概念。他们的意见包括：

- a) 确保所有类型的新建化石燃料工厂，在目前最佳理解的范围内，可以在未来在最小的额外成本和最小的性能损失的情况下进行捕集装置改造；
- b) 对将在捕集预留工厂（和其他现有工厂）转换为捕集工厂时所需的技术进行改进，并将改造经验回馈到捕集预留工厂的设计中；
- c) 确保那些当二氧化碳捕集被广泛普及之时将变得具有竞争力的其他技术，在未来需要时也能立即应用；和
- d) 发展成熟可靠的和社会能接受的二氧化碳封存方案。

捕集预留不应仅限于捕集，因为 CCS 项目是综合捕集、运输和封存的整体。捕集预留的概念应包括场址选择，以确保尽可能多的捕集的二氧化碳被运输到封存地点，以降低 CCS 过程的总成本。而且，“捕集预留”并不局限于某种特定的工厂设计，而是工厂所有者在工厂设计和建设过程中需要进行的一系列投资和设计决策（Bohm et al., 2007）。

全球碳捕集与封存研究院（2010）在国际气候基金（ICF）的支持下，进一步发展了碳捕集预留的概念，并同时更多地考虑了封存和运输的预留。英国政府在修订 1989 年“电力法案”时采用了捕集预留这一概念。该概念于 2006 年通过中国先进电厂碳捕集方案（CAPPCO）项目被带入中国（Li et al., 2012），同时梁希等人（2009）通过一个中国电厂碳捕集预留的假设案例研究中引入了实物期权的概念，使利益相关者了解

对新工厂进行捕集预留改造的内在价值³。捕集预留的概念在中国也被多边银行加以推动，亚洲开发银行（ADB, 2014）在 2014 年推荐了一项捕集预留工厂设计。同年，中国业界将捕集预留的概念纳入了华润电力（海丰）3 号和 4 号机燃煤电厂碳捕集与封存（CCS）预留可行性研究中（GDCCUSC, 2014）。

总之，碳捕集预留的概念随着时间的推移而发展，从狭义上对捕集技术未来改造的基本要求，到对预测和支持未来 CCS 相关需求的广泛理解。该概念不应仅限于“捕集”，因为 CCS 项目是整合捕集，运输和封存一体的全链条项目。因此，碳捕集预留的概念应该合理结合场地选址，以尽可能确保捕集的 CO₂ 都被输送到封存地点，以降低整个 CCS 过程的总成本。

³ 为了了解在中国建设一个新 CCR 电厂的经济评估和投资特点，梁和他的团队调研了位于广东省的一个典型的 600MW 煤粉超超临界电厂。。

4. 钢铁厂碳捕集和封存预留（CCS-ready）技术和设计要求

4.1. 选址考虑

工厂的地理位置在决定其是否适合进行 CO₂ 捕集预留方面起着重要作用，因为在碳捕集装置建成后，捕集的 CO₂ 将被输送用于封存和/或用于提高石油采收率。工厂的选址需要考虑的相关因素包括：

- **应靠近 CO₂ 封存和/或利用的地点：**这将使运输变得容易，并降低运输成本。
- **靠近其他现有或计划中的碳捕集设施：**这样可以实现 CO₂ 基础设施的共用（包括共用 CO₂ 输送管线、道路运输设施，或沿岸地区的水路船舶运输等），从而降低 CO₂ 运输成本。此外，在已建立工业设施的地区，通常公众反对兴建新工厂的风险也较低。

本项目研究人员对地理信息系统（GIS）的初步分析表明，在中国的 142 家年产量超过 100 万吨的钢铁厂中，有 51 家位于距离潜在 CO₂-EOR 封存地的 200 公里半径之内，详见表 1 和图 2。首先，本项目根据《中国钢铁年鉴（2017）》的数据调查了现有年钢产量高于 100 万吨的钢铁厂分布，并在图 2 中标明。然后，对中国主要的潜在 CO₂-EOR 封存地（Dahowski et al., 2009）逐一标记，并且只关注其半径 500 公里以内的所有钢铁厂。由本项目研究组完成的另一个独立报告侧重研究钢铁厂非用于驱油的 CO₂ 封存机会。

表 1. 中国大型钢铁厂附近的潜在 EOR 封存地

潜在 EOR 封存地	200 公里半径以内的钢铁厂数量	500 公里半径以内的钢铁厂数量
胜利油田	4	30
冀东油田	16	17
江汉油田	1	14
江苏油田	8	11
靖安油田	7	10
长庆油田	0	8
中原油田	5	7
四川盆地	2	7
辽河油田	3	6
珠江口盆地	2	4
北部湾盆地	1	3
大庆油田	0	3
延长油田	1	1
准格尔盆地	1	1
塔达木盆地	0	1
总量	51	123

图 2. 中国大型钢铁厂和潜在封存地位置分布



注：图中红色标记为中国大型钢铁厂，蓝色标记为潜在封存地

4.2. 不同烟气的碳捕集技术选择

钢铁厂的烟气排放系统相对比较复杂——不像燃煤电厂那样，仅从一根烟囱统一集中排放。钢铁厂排放源位置相对分散，不同烟气的含量和组分也不相同。因此，对于钢铁厂的不同生产工序，必须考虑各自单独的碳捕集装置。

4.2.1. 钢铁生产工艺和 CO₂ 排放源

一般来说，钢铁生产包括两个阶段：1）**炼铁过程**，从铁矿石中提取生铁；2）**炼钢过程**，生铁被提纯为粗钢。这两个生产过程可进一步分为四个部分：

- 原料制备，包括铁矿石烧结/球团、石灰和焦煤制备；
- 炼铁过程（利用焦炭的作用将金属铁从铁矿石中熔炼出来，或采用直接还原成铁（DRI）法通过固态还原把铁矿石炼制成铁），主要包括两条路线：1）高炉-碱性氧气炉（BF-BOF）路线和 2）电弧炉（EAF）路线。BF-BOF 路线原料采用铁矿石和废钢，通常使用 70%~100% 的铁矿石，废钢作为补充。EAF 路线原料采用直接还原铁、废钢和铸铁料，废钢使用率在 70%到 100%，其余为铁矿石类原

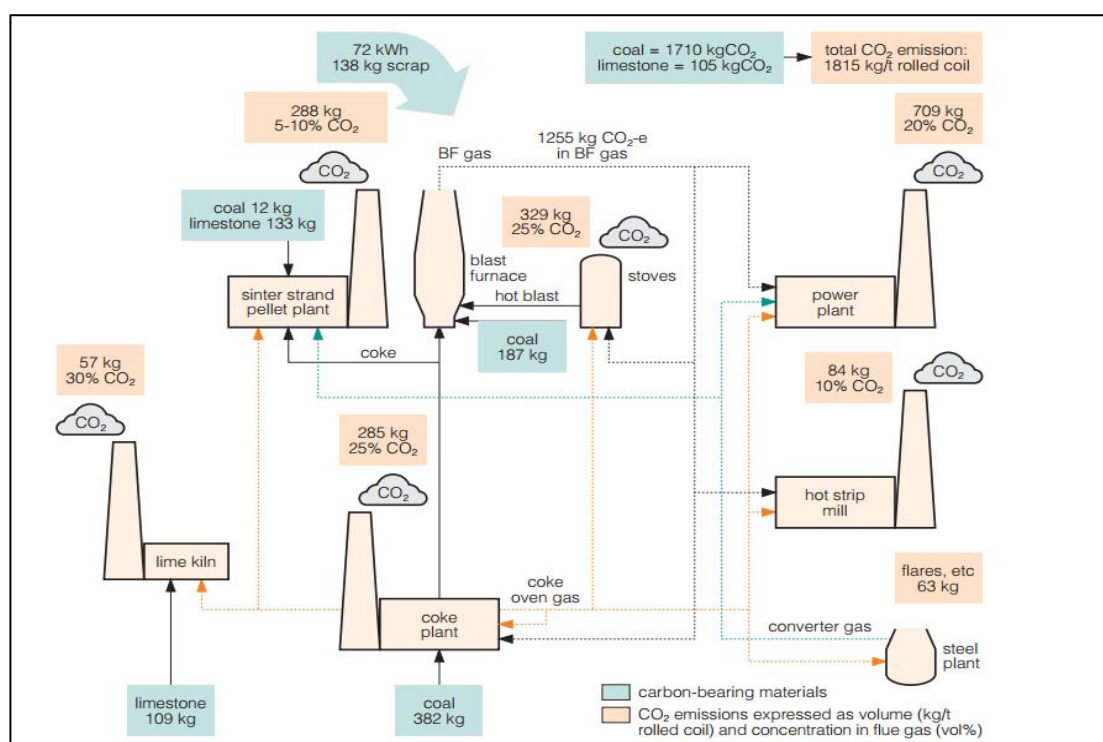
料；

- 炼钢过程（铁水或 DRI 转化为液态金属）；和
- 钢铁浇铸、加热、轧制和成形。

其他辅助设施（包括发电厂）使用来自各种炼铁和炼钢过程的气体燃料，大多数为副产品气，如焦炉煤气、高炉煤气和转炉煤气。

图 3 显示了钢铁厂的典型 CO₂ 排放源，并标示有每吨卷轧钢生产过程排放的 CO₂ 浓度范围和 CO₂ 排放指数。

图 3. 钢铁厂典型 CO₂ 排放源



来源：UNIDO, 2010

中国钢铁企业的 CO₂ 排放源可依据国家发改委发布的《中国钢铁生产企业温室气体排放核算方法与报告指南》（2013）进行认定评估。

与传统高炉-碱性氧气炉工艺相比，基于降低制造过程的能耗和碳排放强度目的的新炼钢工艺设计已经出现。IEAGHG（2018）列出了大量新兴的制造技术，包括电解法炼钢、先进的 DRI-EAF、TGRBF（顶气再循环高炉）、先进的熔炼还原（Hisarna, Hismelt）和固态还原（Corex）。这些新工艺应该在未来 CCS 预留研究中被进一步研究。

4.2.2. 碳捕集技术选项

相关燃烧后 CO₂ 捕集技术的研究明显多于其他方法，其中以胺基吸收剂为主的胺法技术已处于商业化运行的成熟发展阶段（用于燃烧前捕集也能找到商业化的技术）。然而，大规模实施燃烧后碳捕集项目仍然面临各种挑战，例如高能耗、胺降解、胺损失和其他环境问题，以及所带来的捕集成本的上升。然而，一个有利之处在于燃烧后技术是从终端烟道气中进行碳捕集（这能够最小化因置入生产工艺中而带来的上下游影响），因此能够降低装置间交接界面的复杂性（Progressive Energy Limited, 2015: 33）。发展中的新兴技术着重于解决上述的问题，包括开发新溶剂、物理和化学固体吸附、膜法和低温工艺等。

由于存在新技术将来商业上变为可行的可能性，碳捕集预留还涉及到确保任何此类技术在成熟到能够运用并具备竞争性时也可以被随即应用于碳捕集。因此，CO₂ 捕集技术根据其现有的捕集能力从各种气体分离技术中筛选，但是其他潜在技术也应包括在捕集预留的概念设计的考虑范围内。表 2 列出了主要 CO₂ 排放源的特性和潜在的捕集技术，包括实施捕集预留钢铁厂的基本要求。该表提供了一系列的技术选项供以后排选，待选技术名单并且将会不断地被回顾和更新，以便能追踪新兴捕集技术的进展。

4.3. 捕集预留装置的基本要求

根据 IEAGHG（2007）关于捕集预留的定义，开展捕集预留的工厂的决策者有责任确保在其控制范围内识别并消除所有已知的可能影响未来 CO₂ 捕集装置的安装和运行的因素。这些工作包括：

- 对 CO₂ 捕集改造和潜在的预投资选项进行研究；
- 提供足够的场地并为未来可能需要的额外设施预留使用通道；
- 确定 CO₂ 封存的合理途径。

在针对这些基本的捕集预留设施上的预投资预计投入较低。进一步的预投资选项，则能够降低 CO₂ 捕集改造的成本和停工周期。

4.3.1. 钢铁厂用于 CCS 的额外场地

利用胺捕集技术建设碳捕集预留钢铁厂的首要要求是在现场的适当位置指定足够的预留场地，以容纳新增的 CO₂ 捕集设备，与现有工厂设备连接的烟道和管线，以及各种必要的接口。另一个要求是允许配套设施进行扩建以满足捕集设备的额外要求（循环冷却水、辅助配电等）。根据每个系统和设备对场地的需求，本文对空间安排展开了讨论，认为应该考虑并包括的设施有：

表 2. 不同 CO₂ 排放源的捕集技术选项

排放源	烟气特征 (CO ₂ 浓度为体积%)		潜在二氧化碳捕集技术选项		钢铁厂 CO ₂ 捕集预留要求 ¹								
					脱硫 脱硝	预处理	预留 场地	公用工程				化学品 储存	废水 处理
								电	蒸汽	冷却水	其他		
烧结 球团	CO ₂ 5-10% 120-150 °C	CO ₂ 浓度低， CO 浓度高， 成分复杂， 含二噁英、氟化 物、SO _x 、NO _x 和 粉尘	燃烧后	化学吸收	是	是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
焦化烟气	CO ₂ 25% 130 °C	CO ₂ 浓度高 成分复杂 SO _x 、NO _x 和粉尘 含量高	燃烧后	化学吸收	是	是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
焦炉气 (COG) ²	H ₂ 45-64% CH ₄ 20-30% CO 5-10% CO ₂ 2-5%	高热值，高附加值 原料（H ₂ 和 CH ₄ 浓 度高）		化学吸收		是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
石灰窑	CO ₂ 15-30% 110°C	CO ₂ 浓度高 粉尘浓度高	燃烧后	化学吸收		是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
				钙回路 CO 捕集 ³									
高炉气 ⁴ (BFG)	CO ₂ 20-25% CO 20-25% H ₂ 3% 80-150°C	CO ₂ 浓度高 低热值燃料气	燃烧前	化学吸收		是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风 ⁵	是	是
				物理吸收		是	***	**	*	**	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
				膜分离		是	*	****		**	工艺水 仪表风		
				膜分离+物理吸附		是	**	**		**	工艺水 仪表风		

排放源	烟气特征 (CO ₂ 浓度为体积%)		潜在二氧化碳捕集技术选项		钢铁厂 CO ₂ 捕集预留要求 ¹								
					脱硫 脱硝	预处理	预留 场地	公用工程				化学品 储存	废水 处理
								电	蒸汽	冷却水	其他		
热风炉烟 气	CO ₂ 25-28% 155 °C	CO ₂ 浓度高	燃烧后	化学吸收	是	是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				膜分离+物理吸附		是	***	***		*	仪表风		
				膜分离		是	*	****		**	工艺水 仪表风		
				膜分离+物理吸附		是	**	**		**	工艺水 仪表风		
Converter ⁶ 转炉气 ⁶	CO ₂ 15-20% CO 60-70% 100 °C	CO ₂ 浓度低 CO 浓度高	燃烧前	化学吸收		是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				膜分离+物理吸附		是	**	**		**	工艺水 仪表风		
电厂烟气	CO ₂ 20% 120 °C	CO ₂ 浓度高 粉尘浓度低	燃烧后	化学吸收	是	是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是
				膜分离		是	*	****		**	工艺水 仪表风		
				物理吸附		是	***	***		*	工艺水 仪表风		
带钢 热轧机	CO ₂ 10%	CO ₂ 浓度低 含氧化铁粉尘 水分含量高	燃烧后	化学吸收		是	***	*	***	***	工艺水 脱盐水 仪表风	是	是

- Notes: 1. “*” 的数量表示需求的相对大小。
2. 焦炉煤气作为气体燃料送往烧结厂和发电厂，或者采用 PSA 工艺制取 H₂，和化学吸收、低温法生产甲醇。
3. 由台湾水泥股份有限公司及台湾工业技术研究所联合开发的“钙回路 CO₂ 捕集技术”。
4. 低热值高炉煤气将被送往热风炉、焦炉或电厂锅炉，用作气态燃料。脱碳的应用有助于提高煤气的热值。
5. Demin water 指的是脱盐水；Instru. air 指仪表用空气。
6. 转炉煤气（Linz-Donawitz gas - LDG）具有较高的热值，作为气态燃料送到发电厂或其他设备。

- 碳捕集：
 - 烟气预处理装置；
 - CO₂ 捕集单元；
 - CO₂ 压缩液化装置；
 - 原材料储存设施，和
 - 综合楼，包括集散控制系统（DCS）控制室、电气开关柜室、研究实验室和办公室。
- 水、电配套及辅助设施（存在与钢铁厂共用的可能性）：
 - 配电系统（辅助变压器、电缆、开关柜等）；
 - 循环冷却水系统；
 - 水和脱盐水处理；和
 - 废水处理和废物处置系统。
- 其他设施（位于钢铁厂的主生产区域）：
 - 烟道；
 - 公用工程分配系统的管架或埋地管道；和
 - 其他辅助系统，如压缩空气系统、维修和消防站。

4.3.2.潜在碳捕集预留预投资选项

除了满足场地、道路与封存路径的基本要求外，如果进行进一步的预投资，还能够减少二氧化碳捕集改造的成本和停工周期。一些潜在的捕集预留前期投资可以适用于所有技术，包括加大管架设计以及为工厂控制系统和现场配电扩建预先作出安排。这些前期投资通常成本较低，却能显著减少 CCS 改造的成本和停工时间。潜在的预投资可应用于：

- 烟气脱硫设备（FGD）；
- 脱硝设备（DeNO_x）；
- 颗粒物去除单元（袋式过滤器由于能改进气溶胶去除效果，可能比静电除尘器更适合于燃烧后捕集）；
- 蒸汽源和余热回收方案；
- 水-蒸汽冷凝水回路；
- 压缩空气系统；
- 冷却水系统；

- 给水预处理厂；
- 脱盐水处理系统；
- 污水处理厂；
- 电气设备；
- 化学加药和冷凝水分析系统；
- 工厂管架；
- 控制和仪表；
- 安全设备；
- 消防和防火系统；
- 工厂基础设施；和
- 用于 CO₂ 压缩机驱动的汽轮机方案。

虽然一些用于捕集预留的前期投资预计具有低成本和潜在的高收益，但是仍有两个主要原因影响进行重大的捕集预留预投资的决策：经济贴现和不确定性。贴现是一个已经确立的经济原则，它意味着未来的经济资源价值低于现在。此外，由于未来法规和碳信用额度的价值不确定性，是否（或何时）需要捕集也不确定。捕集技术在未来的发展方向也是不确定的。由于不断“从实践中学习”以及渐进的技术进步，捕集技术的成本预计将来会逐步下降。如果一个工厂已经为现有的单一技术做好了捕集准备，那么它就有被将来可能过时的技术锁定的风险，从而使得前期投资毫无价值。因此，捕集预留的工厂应尽可能合理地设计以适应预期的未来技术改进。然而，目前很难预测未来技术发展，而且可能被废弃的风险仍然是未进行大量特定技术前期投资的主要原因。

5. 50 万吨 CO₂ 捕集规模的假设碳捕集预留项目案例研究

本案例研究的目的是对一个假设的 50 万吨级钢铁行业捕集预留项目进行概念设计。因为现行的钢铁厂缺少捕集预留规范，本研究使用英国发布的电厂碳捕集准备指南作为参考。2009 年，英国能源和气候变化部（DECC, 2009）发表了《碳捕集预留指南》，其中 CCR 要求概述如下：

“作为第 36 款申请的一部分，申请者将被要求证明：

- *厂内或附近有足够的地域以容纳未来的碳捕集设备；*
- *应用所选择的碳捕集技术进行改造的技术可行性；*
- *存在一个合适的离岸深层地质封存区域，用于储存电站计划捕集的二氧化碳；*
- *将捕集的 CO₂ 输送到计划的封存区域的技术可行性；以及*
- *在电站的使用年限内存在构建一个完整的 CCS 链的可能性，包括捕集设备、运输和封存在内的改造在经济上是可行的。*

申请者必须在其 CCR 评估中明确哪些 CCS 改造、运输和封存技术方案被认为最适合于他们的发展计划。”

然而，请注意上述提及的离岸封存反映了英国的特殊情况，并不是与中国的钢铁厂 CCS 相关的通用要求。

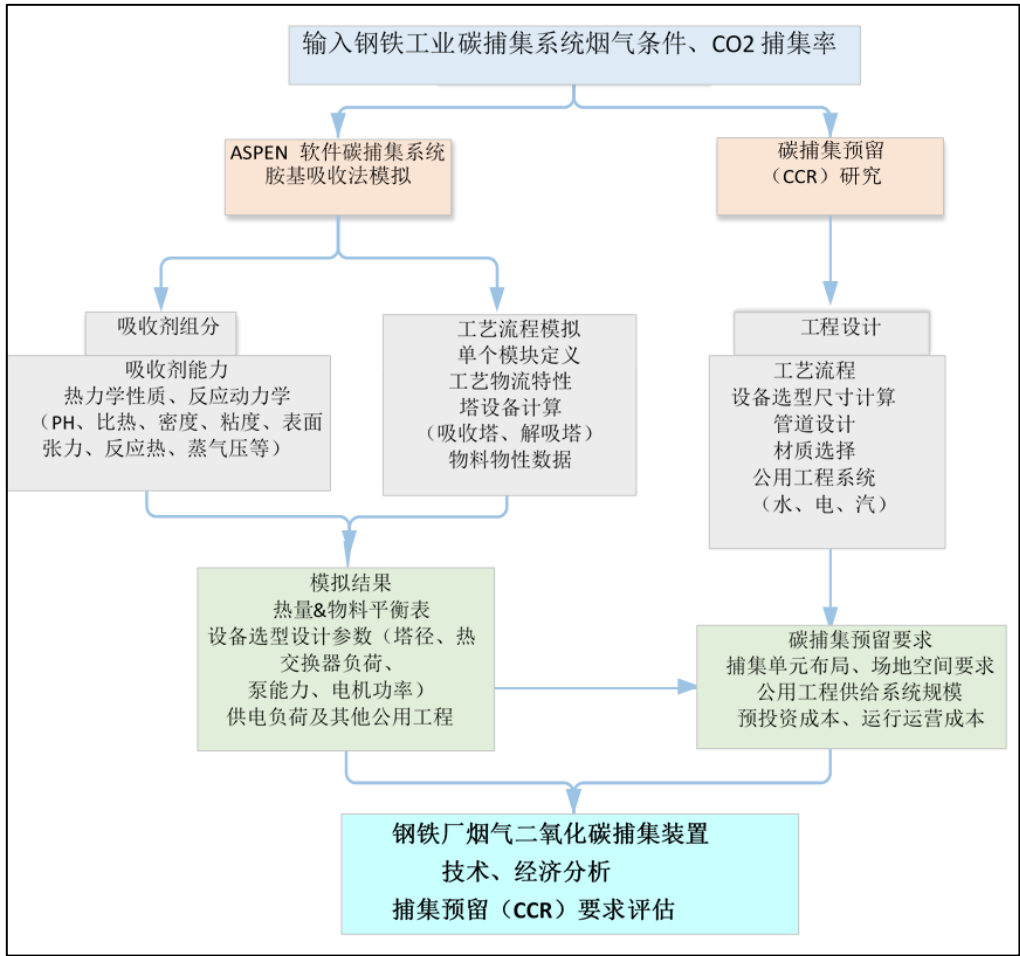
5.1. 技术假设和研究方法

最广泛考虑的燃烧后捕集技术涉及使用化学溶剂，通常是有机胺的形式。胺法技术已经应用于燃煤电厂、天然气厂、煤化工等许多工业的 CO₂ 分离。新型胺液还在不断地研发之中，市场上销售的有机胺包括由各技术供应商研发的专利有机胺，以及非专利的普通有机胺，如 MEA 和 MDEA，它们是最早和最常用于 CO₂ 分离工艺的有机胺家族的成员。与 MEA 相比，专利溶剂通常具有较低的再生热负荷和较高的 CO₂ 吸收能力。一般来说，未来新型有机胺对捕集预留（CCR）的要求不应大于现有普通有机胺的 CCR 要求。因此，本研究将重点评估使用普通胺溶剂（30wt%MEA）作为基准工况的相关碳捕集预留要求（Arasto 等, 2013）。

本研究使用 ASPEN Plus（过程工程的先进系统）软件进行流程模拟，然后利用模拟结果发展一个针对碳捕集预留要求（CCR）的概念设计。ASPEN Plus 是一个经过验证的化学过程模拟软件，广泛应用于研发、大型化工系统设计和化工厂全过程的生产操作

优化。ASPEN Plus 作为一种强大的工程设计工具，可以提供工程设计参数、化学品消耗以及公用工程系统要求等各种信息。运行成本的估算可以基于 ASPEN Plus 模拟的结果来进行，以此作为起点作进一步的技术和经济分析。研究方法如图 4 所示。

图 4. 捕集预留假设案例的研究方法



5.2. 捕集预留研究的假设

5.2.1. CO₂ 排放源

通常，钢铁厂内 CO₂ 排放浓度将在 10-35% 范围内变化，实际浓度取决于不同的排放源、生产原材料和钢铁生产工艺。表 3 则以常规轧制卷钢装置为例，给出了其主要的 CO₂ 排放源。

表 3. 典型的气体入口条件

No.	排放源	吨钢 CO ₂ 排放量	CO ₂ 浓度
1	烧结球团厂	288 kg/t	~5-10%
2	焦化厂	285 kg/t	~25%
3	石灰窑	57 kg/t	~30%
4	电厂	709 kg/t	~20%
5	高炉*		~20%
6	热风炉	329 kg/t	25-28%;
7	带钢热轧机	84 kg/t	~10%
8	火炬	63 kg/t	
	总计**	1815 kg/t	
* 非直接排放到大气中，通常作为低热值燃料送到热风炉燃烧。			
** 1 吨卷轧钢生产过程中将向周围环境排放总量为 1815 公斤的 CO ₂ 。			

来源：IEAGHG, 2007

本研究选取了一个具代表性的烟气浓度——25% CO₂ 进行研究。其他 CO₂ 浓度可能需要考虑选择其他技术。

5.2.2. 入口烟气条件和 CO₂ 捕集能力

本案例研究假设每年从热风炉烟气中捕集 50 万吨 CO₂，捕集效率为 90%。典型入口气体条件见表 4。

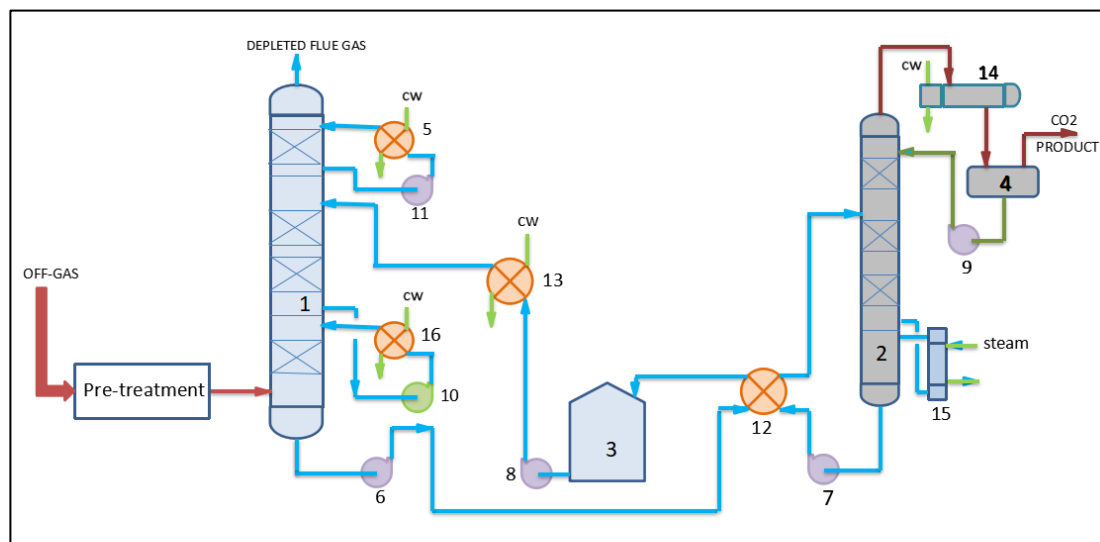
表 4. 典型热风炉入口烟气条件和 CO₂ 捕集能力假设

项目		单位	数值
组成	H ₂ O	Vol %	3.83
	CO ₂	Vol %	25.00
	N ₂	Vol %	68.66
	O ₂	Vol %	2.51
总流量		Nm ³ /h	158,700
年操作小时		Hours	7,200
进入捕集装置的 CO ₂ 总量		kg/h	77,903
预期 CO ₂ 捕集效率		%	90
总 捕集目标		kg/h	70,127
		t/year	504,914

5.2.3.CO₂捕集工艺描述

图 5 给出了胺法碳捕集技术的典型 CO₂ 捕集工艺流程图。

图 5. 典型胺基吸收法工艺流程图



1-吸收塔，2-解吸塔，3-贫胺罐，4-回流罐，5-水洗冷却器，6-富胺泵，7-贫胺泵，8-吸收塔给料泵，9-回流泵，10-中间冷却泵，11-水洗泵，12-贫/富胺热交换器，13-贫胺冷却器，14-冷凝器，15-再沸器，16-中间冷却器

该工艺过程描述如下：

预处理单元

在预处理单元中，烟气温度将降低到 40℃，同时将污染物（SO_x、NO_x、酸雾、灰尘等）浓度降低到较低的水平，从而防止其与溶剂发生不可逆的反应，避免对 CO₂ 吸收过程造成其他负面影响。

烟气被输送到增压风机（图中未列出）以获得足够的压力克服下游设备的压降，然后流至洗涤塔对烟气进行急冷和过冷。洗涤水被送入预洗涤塔内与烟道气直接接触，降低烟气的温度并降低污染物和 SO_x 的含量水平。从预洗涤塔底部流出的热水被送至洗涤水冷却器冷却，然后送回预洗涤塔再利用。可能需要一个液碱供应系统为预洗涤塔补充碱溶液，以减少二氧化硫在烟气中的残留量。

CO₂ 胺基吸收法单元

冷却后的气体随后被输送到 CO₂ 吸收塔。吸收塔内装有多级填料床，胺液从塔顶下淋，通过与自塔底进入的烟气逆流接触从中吸收 CO₂，富含 CO₂ 的富胺液从吸收塔的底部排出，而含低浓度 CO₂ 的烟气从吸收塔的顶部排出。吸收 CO₂ 是一个放热反应，因此为了防止塔内热量积聚，并提高胺的吸收能力，热胺液在底部填料段上方的集液盘被收集并泵入中间冷却器，经冷却水冷却后再循环回吸收塔底部的填料床重新进行 CO₂ 的吸收。

处理过的烟气从 CO₂ 吸收段顶部排出通过水洗段。这部分包括在 CO₂ 吸收塔的顶部，用于捕集来自烟气的任何挥发性和夹带的胺雾滴。向上流动的处理后气体离开水洗段后被释放入烟囱。

来自吸收塔底部的富含 CO₂ 的富胺在贫富胺热交换器中被加热，并被送到 CO₂ 解吸塔，在塔内胺液通过再沸器提供的热量得以再生。来自再沸器的低压（LP）蒸汽凝液被送到工厂冷凝液收集系统。解吸塔的塔顶汽被冷凝器冷却后，两相混合物在回流罐中分离，回流液被返回到解吸塔，而产生的 CO₂ 气体被送到 CO₂ 压缩系统。图 6 显示了作为界区条件输入的设计基础假设，包括预处理单元入口和胺法 CO₂ 吸收单元入口处的烟气组成、流量和压力及温度条件。

图 6. 典型胺基吸收工艺的假设设计条件

碳捕集单元入口典型烟气条件 ¹		吸收塔入口烟气条件 ²	
Vol %		Vol %	
H ₂ O	3.83	H ₂ O	6.83
CO ₂	25.00	CO ₂	24.22
N ₂	68.66	N ₂	66.52
O ₂	2.51	O ₂	2.43
总流量 kg/h	230855	总流量 kg/h	228773
总流量 Nm ³ /h	158700	总流量 Nm ³ /h	163814
温度 °C	155.7	温度 °C	40
压力 atm	1	压力 atm	>4

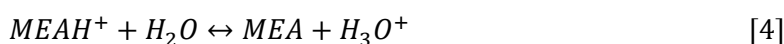
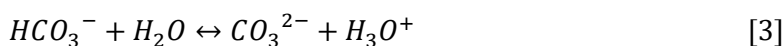
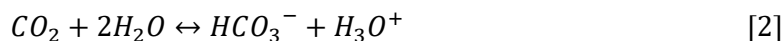
烟气进吸收装置前
先经预处理进行冷却，
去除颗粒物、SO₂、NO_x

根据 IEA（2011）数据进行修改。备注：
1. 典型的烟气条件，也同时列于表 4 中。本案例研究采用 25% CO₂ 的代表性浓度。来源：Iwasa et al., 2015。
2. 高温的烟气被急冷和过冷，然后在水饱和条件下供入吸收塔。

5.2.4. Aspen Plus 模拟模型说明

Aspen Plus 包括广泛的单元工艺模块，可模拟包括混合和分离、闪蒸、加热/冷却和蒸馏的过程，以及诸如反应器、压力改变设备包括泵、压缩机、管道压降等组件。模型选取基于平衡-传质的模拟方法（Equilibrium-based Mass Transfer Approach）。

模拟计算中，主要反应发生在 MEA 和 CO₂ 之间：



吸收模拟的主要目的是确保吸收塔顶部排出的净化后气体中仅含 0.024 摩尔分数的 CO₂。通过调整吸收溶液的参数，包括溶液的组成、吸收温度和循环量，以实现预期的碳捕集性能指标。再生模拟的目的是通过调整再生压力、温度和再沸器的热负荷，使富胺液达到所期望的再生程度。通过调整塔顶冷凝器的温度，使从塔顶排放的再生气中 CO₂ 摩尔分数大于 0.9，满足进一步压缩的要求。

5.3. 模拟结果

5.3.1. 流程图

工艺流程图给出了整个系统的工艺路线配置，如图 5 所示。该图描绘了一个或多个物流从进入系统开始的整个工艺过程，包括所有中间操作单元和之间的连接物流连接管线。

5.3.2. 热量物料平衡（HMB）

工艺模型明确了系统的所有化学成分，从必要的反应物和产品，到蒸汽和冷却水。流程图中的所有产品物流都以热量和物料平衡（HMB）进行汇总；每个工艺物流和单元操作条件都被标记和标识。

工艺模型中的所有单元操作都保持在特定的操作条件下（例如温度、压力和流程）完成。下文的表 5 提供了主要工艺物流的组成、流量、温度、压力和物理性质。模拟结果表明：

- CO₂ 产品气总量（烟气入口物流 S1 为 77902.6kg/h，处理气体物流 S2 为 7776.1kg/h）显示 CO₂ 捕集量 S7 为 70126.5kg/h（每天约 1700 吨），从而实现 90% 碳捕集效率和年捕集 50 万吨的预期目标；
- 由吸收塔中的胺溶剂捕集的 CO₂ 以 70126.5kg/h 的速率从解吸塔中的 CO₂ 富胺液

中解析出来，如物流 S7 所示：

- 在解吸段（解吸塔）物流 S7 中回收的 CO₂ 产品气体，被冷却到适合于下游 CO₂ 压缩的较低温度，其纯度为 97%（重量，湿基）。
- 在物流 S3、S4、S5 和 S6 中给出了胺液循环量，包括贫胺和富胺的流量。

表 5. 主要工艺物流的模拟结果

主要工艺物流 组成	S1 进口烟气	S2 处理后烟气	S3 进吸收塔贫胺	S4 出解吸塔贫胺	S5 进解吸塔富胺	S6 出吸收塔富胺	S7 CO ₂ 产品气	S8 进解吸塔回流液
Mass flow kg/h								
MEA	0.0	76.3	213,613.5	215,433.6	27,243.1	27,243.1	0.0	0.00
H ₂ O	8,996.2	39,365.9	790,735.0	758,223.7	757,489.7	757,489.7	2,164.8	39,934.04
CO ₂	77,902.6	7776.1	0.0	18.4	13.4	13.4	70,126.5	49.69
H ₃ O ⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.09
OH ⁻	0.0	0.0	10.3	4.3	1.2	1.2	0.0	0.00
HCO ₃ ⁻	0.0	0.0	472.9	2,294.9	8,765.3	8,765.3	0.0	0.28
CO ₃ ²⁻	0.0	0.0	1,973.4	124.2	3,427.8	3,427.8	0.0	0.00
MEAH ⁺	0.0	0.0	83,177.7	81,216.6	183,568.3	183,568.3	0.0	0.00
MEACOO ⁻	0.0	0.0	131,719.1	131,774.9	280,873.3	280,873.3	0.0	0.00
N ₂	136,187.4	136,182.6	0.0	0.0	4.8	4.8	4.8	0.00
O ₂	5,686.9	5,686.5	0.0	0.0	0.4	0.4	0.4	0.00
CO	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
H ₂	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
H ₂ S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
S ²⁻	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00
总流量 kg/h	228,773.0	189,087.4	1,221,701.8	1,189,090.8	1,261,387.1	1,261,387.4	72,296.5	39,984.1
总液相流量 m ³ /h			1,158.2	1,193.2	1,189.3	1,138.0		40.5
总气相流量 Nm ³ /h	163,814.0	165,908.0					38411.9	
总气相实际流量 m ³ /h	173,780.2	205,906.1					30353.1	
压力 kPag	8	2	300	76	205	2	48	200
温度 °C	40	73	40	119	112	56	46	46
摩尔气相分率	1.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00
密度 kg/m ³	1.316	0.918	1,054.9	996.6	1,046.3	1,108.4	2.382	988.4

5.3.3. 设计参数

1) 吸收塔、解吸塔设备计算

Aspen Plus 使用填料算法（塔尺寸基于化工填料高度和直径）进行塔尺寸估算。塔设备采用压降通用关联式进行计算（见表 6）。

吸收塔和解吸塔的填料参数请见表 7 和表 8。吸收器和解吸塔直径分别估计为 7.3m 和 5.8m。

表 6. 塔计算准则

准则	说明
用分数表示最大能力接近程度	在交互计算模式下，塔径计算是使得最接近该段中任何点的最大能力等于该值。
设计能力因子	在交互计算模式下，塔径计算是使得最大能力因子等于该值。应采用最高流量的设计条件下，应用该因子进行尺寸（直径）计算。

表 7. 吸收塔参数

设计参数	Values	Unit
塔径	7.3	m
最大负荷分率	0.58	
最大负荷因子	0.06	m/s
塔段压降	2318	N/m ²
平均高度压降	77.25	N/m ³
最大持液量	9.23	m ³
最大液相空塔速度	0.01	m/s
比表面积	249	m ² /m ³

表 8. 解吸塔参数

设计参数	Values	Unit
塔径	5.8	m
最大负荷分率	0.59	
最大负荷因子	0.04	m/s
塔段压降	852	N/m ²
平均高度压降	42.58	N/m ³
最大持液量	1.90	m ³
最大液相空塔速度	0.01	m/s
比表面积	249	m ² /m ³

2) 换热器设备计算

根据指定的操作条件，ASPEN Plus 输出加热或冷却设备的热负荷，并且也给出在指定压力和温度下，所需蒸汽和冷却水的消耗量（见表 9）。

表 9. 换热器的模拟输出参数

	热负荷 (GJ/h)	所需加热和冷却介质	
贫胺冷却器	101	3026 m ³ /h	Cooling water
贫/富热交换器	223		N/A
冷凝器	103	3100 m ³ /h	冷却水
再沸器	290	137 T/h	低压蒸汽

3) 泵、增压风机和压缩机设备计算

泵、增压风机，压缩机的输送能力和压力变化将由工艺路线配置决定。基于输入信息，ASPEN Plus 提供了驱动转动设备所需的电机功率，如表 10 到表 12 所示。

5.4. CO₂ 捕集、压缩概念设计

本节内容概述了基于 Aspen Plus 的模拟结果而进行的二氧化碳捕集和压缩装置概念性设计。

5.4.1. 设备规格

所需设备可分为四类：

- 塔、容器、罐；
- 热交换器；
- 转动设备；和
- 其他特殊设备（包括过滤器等）。

依据从 ASPEN Plus 模型中提取的工程设计参数，关键的规格信息总结在表 10 和 11 的初步设备清单中。

表 10. 二氧化碳捕获初步设备清单

塔、容器和罐				
No.	设备名称	外形尺寸 (mm)	数量	备注
1	预洗涤塔	D 7,300	1	
2	吸收塔	D 7,300	1	
3	解吸塔	D 5,800	1	
4	贫胺罐	D 7,000	1	
5	新胺液罐	D 7,000	1	
6	回流罐	D 2,000 x H 5,000	1	水平式
7	冷凝液罐	D 2500	1	
8	胺液收集罐	D 2,500 x H 4,000	1	水平式

换热器						
No.	设备名称	热负荷 (GJ/h)		数量	备注	
1	洗涤水冷却器	16		1		
2	贫胺冷却器	51		2		
3	贫/富胺热交换泵	112		2		
4	冷凝器	52		2		
5	再沸器	150		2		
6	其他冷却器	100		2		
转动设备						
No.	设备名称	流量 & DP		电机 kW	数量	备注
		m³/h	kPa			
	引风机					
1	增压风机	83,500	7	300	3	一备
	泵					
1	洗涤水泵	800	200	75	2	一备
2	新胺液泵	12	200	1.5	1	
3	吸收塔给料泵	580	400	110	3	一备
4	富胺泵	570	470	132	3	一备
5	中间冷却泵	570	180	55	3	一备
6	水洗泵	700	200	45	2	一备
7	回流泵	41	350	7.5	2	一备
8	贫胺泵	600	170	55	3	一备
9	蒸汽凝液泵	140	200	18.5	2	一备
10	胺液热回收泵	57	500	15	2	一备
11	胺液收集泵	12	200	1.5	1	

DP: 泵、增压风机/压缩机出口压差

表 11. 二氧化碳压缩初步设备清单

塔、容器和罐						
No.	设备名称	外形尺寸 (mm)		数量	备注	
1	罐	D 7,300		1		
换热器						
No.	设备名称	热负荷(GJ/h)		No.	备注	
1	气体冷却器	17		4		
转动设备						
No.	设备名称	流量 & DP		电机 kW	数量	备注
		m³/h	MPa			
	压缩机					
1	CO₂ 压缩机	15,000	7.8	3,800	2	
	泵					

5.4.2.公用工程消耗

本节提供了 CO₂ 捕集和压缩的概念性设计的公用工程消耗的详细信息（见表 12），其数据基本上基于 ASPEN Plus 模拟。

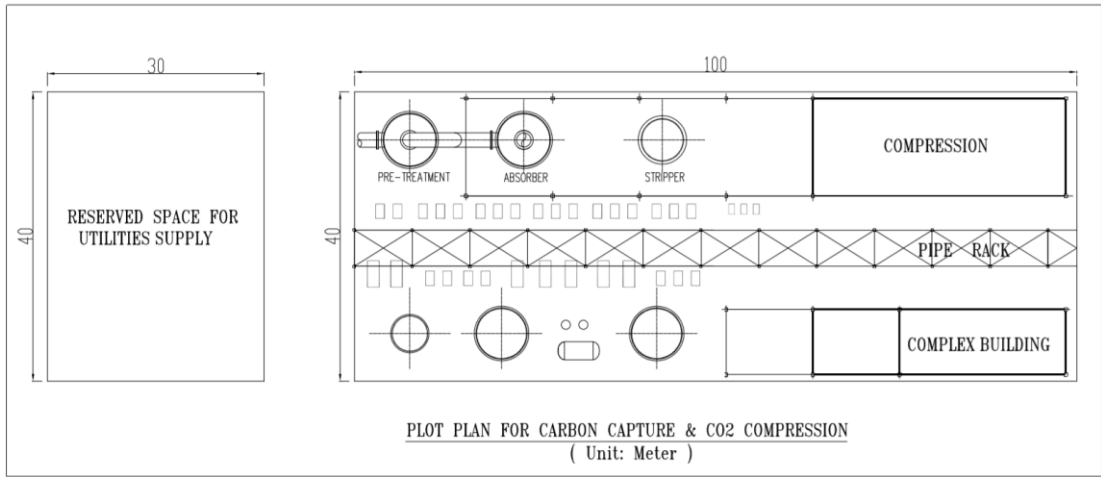
表 12. 公用工程消耗

项目	用户	数量		备注
蒸汽 (350kPag, 饱和)	胺法捕集	137 t/h		
	其他用户	10 t/h		
循环冷却水 (假设供水和回水温度分别为 32℃ 和 40℃)	预处理	500 t/h		
	胺法捕集	10,000 t/h		
	CO ₂ 压缩	2,000 t/h		
	总计	12,500 t/h		
工艺水	预处理	4 t/h		
脱盐水	胺法捕集	4 t/h		
电		运行	安装	
	预处理	700 kW	1,050 kW	
	胺法捕集	800 kW	1,250 kW	
	CO ₂ 压缩	7,700 kW	7,700 kW	
	总计	9,200 kW	12,030 kW	
仪表风		40 Nm ³ /h		~600 kPag

5.4.3.设备布置

依据表 10 和表 11 列出的主要设备，进行的初步设备布置如图 7 所示。

图 7. 二氧化碳捕集、压缩装置及公用工程设施初步布置



根据初步的布置图可知，需要预留一个大约 **4000** 平方米（100m×40m）的矩形区域，以容纳预处理单元、胺捕集单元和用于 CO₂ 运输和储存的 CO₂ 压缩单元的设备，以及包括控制中心、实验室和电气开关柜室等的综合建筑。公用工程供应设施或许需要预计约为 1200 平方米（30m×40m）的额外场地。

5.4.4. 能源回收方案的综合评价

5.4.4.1. 钢铁厂余热回收潜力分析

副产品气体是钢铁工业的重要二次能源（见表 13），可占该行业总能耗的 30-40%（He 和 Wang, 2017）。副产品气体主要包括高炉气 BFG、转炉气 LDG 和焦化煤气 COG，这些气体在日本和德国基本都进行了回收和使用。然而，在中国副产气还未得到 100% 的回收利用，仍有部分被排往火炬。

余热是钢铁工业的另一个重要的二次能源。余热回收可以通过各种技术来实现，以提供有价值的能源，降低总能耗。在中国，生产每吨钢产生 8.44 GJ 余热，其中仅回收 28%。因此，余热回收和利用在钢铁工业具有很大的潜力。

表 13. 钢铁工业副产品气体

	化学成分	热值	吨产品产出量
BFG	H ₂ 4% CO 25% CO ₂ 20% Remainder is N ₂	3,000-3,800 kJ/m ³	1,400-1,800 m ³ /吨铁
LDG	CO ₂ 15-20% O ₂ ≤ 2% CO 60-70% N ₂ 10-20% H ₂ ≤ 1.5%	7,500-8,000 kJ/m ³	80-100 m ³ /吨铁
COG	H ₂ 45-64% CH ₄ 20-30% CO 5-10% CO ₂ 2-5% O ₂ 0.1-4% CnHm 0.1-3%	16,000-19,300 kJ/m ³	400-450 m ³ /吨铁

来源：IEA, 2007

表 14. 中国钢铁工业不同品质余热回收利用

余热的品质	数量和回收率		说明
150℃以下 低品级	总量 (GJ/t-s)	2.89	废蒸汽、热水、各种低温烟气和低温物料等
	回收量 (GJ/t-s)	0.22	
	回收率 (%)	7.61	
150-500℃ 中品级	总量 (GJ/t-s)	2.19	高炉煤气和烧结烟气、烟气一次余热回收后的热烟气等。
	回收量 (GJ/t-s)	0.66	
	回收率 (%)	30.2	
500℃以上 高品级	总量 (GJ/t-s)	3.36	高温烟气：焦炉煤气、转炉煤气、电炉气和加热炉烟气等； 高温液体：铁渣、钢渣、高温水等； 高温固体：烧结物料、高温焦炭、高温钢等。
	回收量 (GJ/t-s)	1.49	
	回收率 (%)	44.4	

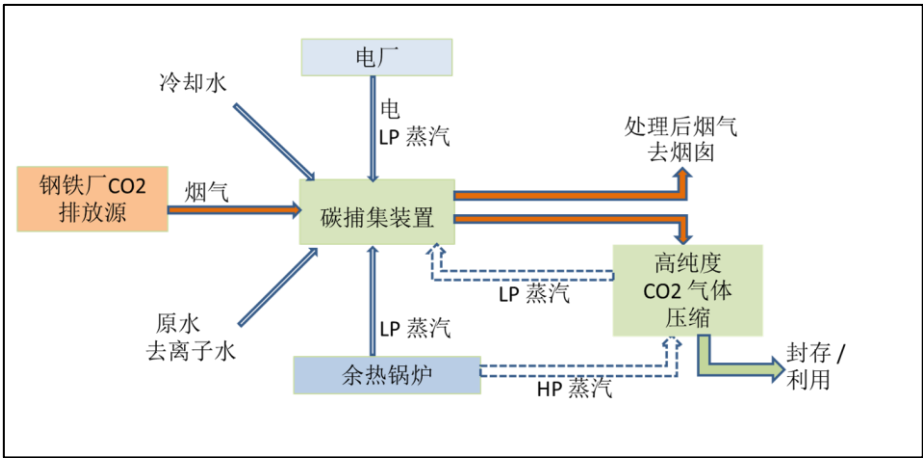
来源：He 和 Wang, 2017

5.4.4.2. CCS 中的余热综合利用

根据研究结果，在 CCS 中，能量主要消耗在两个阶段：送入再沸器用于胺再生的 137t/h、0.35MPa 低压蒸汽，用于假设的 CO₂ 压缩机的 7100kW 电耗。汽轮机非常适合作为驱动锅炉给水泵、强制引风机（ID）、鼓风机、压缩机和其他转动设备的驱动机。此类应用一般在采用背压式非凝气汽轮机时，汽轮机的低压排放汽通常可用于加热给水、预热除氧器补充水和/或其他工艺要求。

本研究假设使用汽轮机驱动多级 CO₂ 压缩机。如图 8 所示，高压蒸汽（HP）被送入汽轮机去驱动 CO₂ 压缩机，低压蒸汽（LP）从背压汽轮机排出，然后作为热源返回碳捕集单元的再沸器。

图 8. 余热在 CCS 中的综合利用



基于一般工程设计原则，汽轮机是大型压缩机和水泵（通常驱动功率为 1000kW 或以上）的节能首选。与电机相比，汽轮机的使用消除了巨大的起动电流对电网的影响。表 15 给出了压缩机特性的估算；CO₂ 液化过程采用四级压缩。相应地，估算表明，汽轮机使用中等级 2.35MPa 蒸汽的消耗总量为 102t/h，能够产生多级 CO₂ 压缩机所需的 7.1MW 的总轴功率。

表 15. 压缩机和汽轮机特性计算

项目	单位	1 级	2 级	3 级	4 级
多级压缩机					
CO ₂ 气体进/出	气体流量 kmol/h	1,714	1,616	1,606	1,600
	压力 MPa	0.149 / 0.401	0.401 / 1.079	1.079 / 2.901	2.901 / 7.800
	温度 °C	40 / 140	40 / 132	40 / 134	40 / 136
用电量	MW	2.0	1.8	1.7	1.6
冷却负荷	GJ/h	12	7.5	7.4	12
汽轮机蒸汽消耗					
发电能力	MW	7.1			
蒸汽进汽/蒸汽排汽	蒸汽 t/h	102			
	压力 MPa	2.35 / 0.49			
	过热温度 °C	390 / 252			
	焓值 kJ/kg	3219.4 / 2965.8			
	焓值 kJ/kg.K	7.013 / 7.29			
蒸汽消耗	kg / kWh	14.2			

市场上销售的某些汽轮机的规格在表 16 中给出，以供参照。

表 16. 汽轮机规格

项目	规格 1	规格 2	单位
汽轮机型号	B1.6~B3	B3~B8	
发电能力	1.6~3	3 ~ 8	MW
入口蒸汽	2.3~4.9	2.3~4.9	MPa
	300~470	300~470	°C
排出蒸汽	0.2~2.5	0.2~2.5	MPa
蒸汽消耗	8 ~ 14		kg/kWh

从汽轮机排出的 102t/h、0.49MPa 的低压蒸汽可供胺法捕集装置的再沸器使用。该蒸汽量小于再沸器总蒸汽需求，不足部分可以由其他低品级蒸汽源提供。如表 13 所示，中国大多数钢铁厂 70% 的中级（150~500°C）余热未被回收，因此，回收余热用于 CO₂ 捕集和压缩的潜力巨大。这将有利于 CCS 在中国钢铁生产中的应用。

燃烧后捕集技术被认为在不久的将来技术上可行。作为技术选项之一，通过利用钢铁生产过程本身的余热，可能使大多数钢铁厂能够负担得起胺法捕集技术。还可以避免在钢铁行业开展 CCS 时，因额外的蒸汽和电力生产而产生的 CO₂。

5.5. 钢铁厂设计中的捕集预留要求

本节中讨论的捕集预留要求是能够便于钢铁厂未来采用胺法 CO₂ 捕集改造的“基本”要求。所讨论的捕集预留特点是仅需要较小的额外投资，且在没有碳捕集运行的工况下操作时对工厂的性能有较低的影响。

5.5.1 场地需求

在现场适当位置留有足够的额外场地以容纳新增的二氧化碳捕集设备和其所需的相应接口是建设采用胺法碳捕集技术的捕集预留钢铁厂的首要要求。另一个要求是允许扩建配套设施（BoP）以满足捕集装置带来的新增公用设施需求（如冷却水、辅助配电等）。

场地要求需要针对每个系统和设备的需求逐一进行讨论。对本案例研究，场地需求如下：

- CO₂ 捕集设备：根据第 5.4.3 节的描述，为捕集单元需预留的场地估计约为 4000 平方米（100m×40m），包括预处理单元、胺单元、操作控制楼以及用于 CO₂ 封存输送的 CO₂ 压缩单元；
- 公用工程设施预留需求估计约 1200 平方米（30m×40m）；
- 热风炉新建和改造：预留空间给在引风机（ID）和胺洗涤吸收塔之间的烟道，直径约 1.5 米；
- 预留风机的空间，用于抵消燃烧后捕获吸收单元中产生的压降；
- 余热锅炉（WHB）的新建和改造：需要考虑余热锅炉 WHB 留有相应空间，用于将大型低压蒸汽管道（大约 1m×1m 空间）输送到胺洗涤吸收单元；
- 配套设施（BoP）的扩建和新建空间预留，以满足捕集装置带来的新增公用设施需求；
- 额外的车辆运输（胺液运输等）；和
- 基于危险和可操作性分析研究（HAZOP）给出的场地布置导则，考虑储存和处置胺液、处置 CO₂ 所需的空間。

除了捕集装置所需的安装场地外，工程建设的施工活动也需要相应空间。当场地允许时，在现场储存材料、工具和安装部件的施工成本通常比场外施工更低。

5.5.2 脱硫装置（FGD）

近年来，在中国钢铁行业的排放标准愈加严格，颗粒物、二氧化硫和氮氧化物允许排放标准值分别从 40、180 和 300 mg/m³ 缩减到 20、50 和 100mg/m³。但为了减少由于吸收剂与二氧化硫反应造成的吸收剂降解，烟气脱硫（FGD）装置必须设计做到能将烟气中的 SO_x 降到很低的水平，例如 10~30 毫克/立方米——甚至低于当前的环境法规的限制。

对于设计了能够满足未来烟气要求的脱硫装置（FGD）的钢铁厂，预计没有额外的场地要求。对于烟气脱硫装置设计仅符合当前 SO_x 排放限制的钢铁厂，可能会出现额外的捕集预留要求。这取决于烟气脱硫装置的设计，这些需求讨论如下：

- a) 如果原 FGD 的设计和建造允许在未来进行机械设备的改造或化学反应的强化以达到胺洗涤吸收单元的 SO_x 水平，则预计在烟气系统中没有额外的捕集预留要求。
- b) 如果最初的 FGD 设计和建造不允许进行机械设备的改造或化学反应的强化，要满足胺洗涤吸收单元的 SO_x 水平限制，则烟气脱硫需要新建一个碱洗段。ID 风机可能无法适应由 FGD 碱洗段引入的附加压降，并且还可能再需要一个增压风机。因此，必须考虑安装增压风机的空间以及相关的烟道系统和预先的进出接口。

对于没有任何脱硫设施的钢铁厂，将需要在合适的位置安装脱硫装置，风机排放管道和之间的烟道连接系统，并酌情考虑新的引风机/增压风机。所需的空间取决于不同的烟气源和 SO_x 浓度。

5.5.3 蒸汽 - 冷凝水回路

本节讨论蒸汽 - 冷凝水系统的捕获预留要求。在工厂 CO₂ 捕集运行期间，胺洗涤吸收装置再沸器需要来自余热锅炉（WHB）的蒸汽（基于当前的胺基吸收剂）。钢铁厂凝结水系统通常由 2×100%的凝结水泵或 3×50%的凝结水泵组成。在捕集改造后，这种布置将导致泵在非最佳条件下运行。为了使凝结水泵在捕集改造前后在最佳条件下运行，可以考虑采用 3×60%的凝结水泵选型对应的预投资。

5.5.4 冷却水系统

如前所述，冷却设备预计需要 12500 t/h 的冷却水（假定供水温度和回水温度分别为 32℃/40℃）。冷却水的需求量会随当地天气条件以及水冷却系统类型而变化。新增冷却塔和冷却水管道要求取决于所设定的冷却水系统的类型（闭式冷却或海水/淡水直接冷却）。可以进行以下预投资以减少 CO₂ 捕集改造工程量：

- 对于具有直流式淡水和海水冷却系统的钢铁厂：如果当地法规或已经获得的许可不允许排放水温上升到捕集改造之前确定的限度之外，预投资则被需要用来提高冷却水供水和排水能力，以容纳额外估算的消耗量（例如，更大的冷却水泵和更大的冷却水管）。
- 对于具有闭式冷却系统的钢铁厂：由于在捕集改造期间增加单独的辅助冷却水网以满足捕集设备辅助冷却水的需求是一种更可行的方法，因此预计不需要进行捕集预留的预投资。

5.5.5 压缩空气系统

由于增加捕集设备需要额外的压缩空气，配备捕集预留的钢铁厂可以考虑对压缩空气系统的规模和选型进行预投资，算入未来的压缩空气需求。这可能要求对单个压缩机以及相应的干燥器和接收器在设计能力上增加裕量。

5.5.6 给水处理厂

为了满足捕集设备未来额外的冷却水要求，可通过以下方式在捕集预留的原水预处理厂区进行预投资：

- 在给水处理厂的处理规模和选型时，要将估计的未来增加的原水能力需求包括进去；
- 增加给水箱的储存容量，以适应未来储存需求的增加；
- 冷却水系统的补充水需要被计入未来增加的需求量。

据估算，4m³/h 的给水量可以满足烟气预处理系统中补水的需要，但是它不包括冷却水系统的补给水，因开放式循环水冷却系统中的水分蒸发而需要补充大量的补给水 - 补水量取决于当地气象条件，很难在此预测。如果采用闭式冷却水系统，则不需要任何补给水。

5.5.7 离子水/脱盐水车间

由于去离子水的需求量在 CO₂ 捕集改造后预计将增加 4m³/h，因此预计该系统需要进行捕集预留设计，增加水处理能力。

5.5.8 废水处理厂

预计需要对废水处理厂进行新建和改造，使其能够处理并安全处置来自捕集设备的新增废水。由于可能需要不同的废水处理方案，有可能必须安装单独的废水处理系统，并接入工厂废水排放管网。因此，预投资将只考虑增加共用排放管网的管径，以确保其能够容纳足够的废水，而单独的处理系统可以随着捕集改造工程在未来安装。

5.5.9 供电

胺捕集单元以及同时建设的烟气冷却、烟气碱洗（如果需要的话）和 CO₂ 压缩装置将带来很大的电力负荷（泵、风机、压缩机），并且工厂辅助配电系统也需要增加很多设施。预计在以下区域进行预投资将减轻未来的 CO₂ 捕集改造强度：

- 设计和建造电缆地下通道和电缆沟，包括电缆井和架空的电缆支架，以应对未来的电缆铺设工作；
- 开关柜和电机控制中心电缆的选择，需考虑捕集改造后的新增辅助设施的估算电耗(不包括胺洗涤吸收单元和 CO₂ 压缩装置的功率消耗，因为要设一个专用独立的电源系统向这些用电设备供电)。

如第 5.4.2 节所讨论的，运行碳捕集和压缩装置预计共需要 9200kW 的额外电负载。如果泵电机功率超过 250kW，将选择配备高压电机。配电系统应考虑两种：低压电动机和高压电动机。

如第 5.4.4 节所讨论的，余热回收的应用可以通过采用由背压汽轮机驱动的 CO₂ 压缩机来降低约 7100kW 的电力负荷。如考虑这个选项，预投资可以用于预留连接余热锅炉的接口，以便于未来的 CO₂ 捕集改造。

5.5.10 化学加药系统和蒸汽、水分析系统

由于 CO₂ 捕集改造对蒸汽冷凝水和给水化学处理方面没有新的要求，因此预计无需在化学加药系统上增加捕集预留的预投资。在主生产工艺集成新建捕集设备之后，预期会在热交换器出口监测冷凝水的质量，作为冷凝水加热的一部分还可在胺洗涤吸收装置中进行。可以考虑在取样管网和操作面板的蒸汽和水分析系统中预先投资，以便于未来添加这些取样点。

5.5.11 工厂管架

在下列区域预投资考虑将利于减少新增管道工程所需的改造工程量（参见图 7 所示的捕集改造所需的管道工程）：

- 管架结构设计（靠近各自的系统）能允许增加额外的管道荷载；
- 在各自系统附近的管架上的预留，以容纳新增的管道；
- 汽轮机厂房中的预先布置大口径的低压蒸汽管道走向。

5.5.12 控制与仪表

胺洗涤吸收单元、CO₂ 压缩单元，以及主装置与捕集设备之间水-蒸汽-冷凝液循环的一体化系统，需要引入额外的控制仪表和控制回路，以确保钢铁厂的可靠和安全运行。由此产生的附加 I/Os（输入/输出）需要由工厂控制系统兼容。这将要求额外的控制模块和控制板，监控系统和额外的线缆。基于估算的额外 I/O 点，预投资需求如下：

- 工厂控制系统设计包括未来需要的额外的 I/O 点；以及
- 工厂控制网络（数据总线）设计时能包容（估计的）未来新增的信号。

应当注意，DCS 和历史数据系统通常被授权用于指定数量的 I/O 通道，并且可能不容易被扩展。上述预投资可以消除这种风险，并简化捕集设备控制系统与主装置控制系统的集成。

5.5.13 安全

安全方面预计不需要增加捕集预留上的预投资。

5.5.14 消防和防火系统

工厂消防方面预计不需要增加捕集预留上的预投资。

5.5.15 工厂基础设施

工厂基础设施方面预计不需要增加捕集预留上的预投资。

5.5.16 蒸汽来源选项

所需的蒸汽可以通过两个选项提供，余热回收锅炉或驱动多级 CO₂ 压缩机的背压汽轮机。余热回收是供应给胺再生系统的低压蒸汽源的很好的选择。因此，应预留余热锅炉的安装空间，预投资时建议预留用于未来改造时连接现有设施的接口。

5.5.17 实验室分析

为了支持 CCS 工厂的操作，实时实验室吸收剂分析是必不可少的。胺法工艺的分析仪器可能与炼钢所需的分析仪器有很大的不同。然而，仍有可能与钢铁厂共用实验室设备和实验室。因此，预投资只涉及到在建筑设计中预留额外的实验室房间即可。

6. 结论

本报告回顾了“碳捕集预留”概念的发展历程，指出随着时间的推移，该概念从狭义的对未来进行捕集技术改造的基本要求，发展到广义的预测并支持未来捕集、运输和封存全流程中的 CCS 相关需求的理解。

本报告重点研究了在中国钢铁厂开展碳捕集与封存预留（CCS-ready）需要考虑的关键因素，包括：

- 钢铁厂的**地理位置**决定了其是否适合进行碳捕集。在建设碳捕集装置之后，捕集的 CO₂ 能够被输送出去用于地质封存和/或提高石油采收率；
- 利用选取的碳捕集技术进行钢铁厂改造的**技术可行性**；
- 未来在厂区或附近能够提供**足够的场地**空间容纳碳捕集设备；以及
- **进行预投资**能够在未来改造中减少捕集改造工程量、缩短工厂停工时间。

根据本项目对 GIS 系统的初步分析，中国 **142 个年产量超过一百万吨的钢铁厂中有 51 个位于潜在 CO₂-EOR 封存地的 200 公里半径范围内**。这为进一步研究钢铁厂 CO₂ 封存机会提供可能。本报告回顾了适用于钢铁厂九种烟道气流的多种碳捕集技术的基本要求，为进一步的选择提供依据。对这些捕集技术方案保持持续的回顾和更新，将有助于跟进新兴捕集技术的进展。同样重要的是，要能够确保钢铁厂可以接纳目前可能没有竞争力的新技术，以便当这些新技术变得可行时能够被及时采用。

为发展一个满足钢铁厂碳捕集预留要求的概念性设计，本报告对一个年捕集 50 万吨的假设 CCSR 项目案例进行了研究。研究假定使用目前最成熟的碳捕集技术：吸收剂选择通用非专利性胺溶液（30wt% MEA 溶液），烟气中 CO₂ 含量 25%，捕集速率 70tCO₂/h，预期捕集效率 90%，使用 ASPEN Plus 过程仿真软件来开发 CCSR 概念设计。研究结果总结如下：

- 在本案例研究中，提出了一个概念性的碳捕集系统设计，包括一个含主要工艺物流和设备的胺法吸收过程流程图，物料与热平衡、初步的设备尺寸规格、公用工程消耗以及其他关键工程性能参数；
- 50 万吨规模碳捕集单元需要预留场地约为 4000 平方米，容纳预处理单元、胺法捕集单元、控制楼以及用于 CO₂ 运输和储存的 CO₂ 压缩单元等。公用工程供应设施估计需要额外 1200 平方米的空间。
- 余热综合利用将有利于在中国钢铁生产中应用 CCS。建议采用背压式汽轮机代

替 7100kW 大功率电机驱动压缩机进行 CO₂ 多级压缩。汽轮机利用余热锅炉回收的蒸汽做功，排出的低压蒸汽然后被送到碳捕集单元的再沸器中，为胺再生提供大约 75%的热量（在没有应用 MVR 工艺热回收方案的工况下）；和

- 提出了潜在的预投资方案，为未来的碳捕集改造增加便利条件。

总而言之，本研究提供了支持工厂捕集预留设计的分析途径和工程设计原则。由于具体的设计和实施取决于钢铁厂所采用的碳捕集工艺类型，因此应用到一个具体的钢铁厂碳捕集预留项目时，将会在前端工程设计（FEED）阶段发展一个更详细的钢铁厂 CCS 预留概念设计。

参考文献

- Arasto, A., Tsupari, E., Kärki, J., Pisilä, E., & Sorsamäki, L. (2013). Post-combustion capture of CO₂ at an integrated steel mill—Part I: Technical concept analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, pp. 271-277.
- Asian Development Bank (ADB) (2014). *Carbon Capture and Storage (CCS) – Ready Policy to Facilitate Future CCS Deployment in the People's Republic of China*. Available at: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/180082/ccs-ready-policy-prc.pdf> [Accessed March 20, 2018]
- Bohm, M.C., Herzog, H.J., Parsons, J.E., Sekar, R.C., (2007). Capture-ready coal plants – Options, technologies and economics, *International Journal of Greenhouse Gas Technologies*, 1, pp. 113-120.
- China Steel Yearbook (2017). The Editorial Board of China Steel Yearbook.
- Chinese National Development and Reform Commission (2013). The Guidelines to Ironmaking and Steelmaking Enterprises for Accounting Methods and Reporting of Greenhouse Gas Emissions in China (trial)
- Dahowski, RT., Li, X., CL, Davision., Wei, N., Dooley, JJ. (2009) Regional Opportunities for CarbonDioxide Capture and Storage in China. U.S. Department of Energy. https://energyenvironment.pnnl.gov/pdf/roccs_china_pnnl_19091.pdf
- DECC (UK Department of Energy and Climate Change) (2009). *Carbon Capture Readiness*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/43609/Carbon_capture_readiness_-_guidance.pdf [Accessed May 10, 2018]
- GCCSI (Global CCS Institute) (2010). *Defining CCS: an approach to an international definition*. <https://www.globalccsinstitute.com/publications/defining-ccs-ready-approach-international-definition> [Accessed April 10, 2018]
- GDCCUSC (UK-China Guangdong CCUS Centre) (2014). *China Resources Power (Haifeng) Units 3 and 4: 2 x 1000 MW Ultra-Supercritical Coal-fired Plants Carbon Capture Readiness (CCR) Report. No. 2014/D03*. Available at: <http://www.gdccus.org/col.jsp?id=116> [Accessed March 10, 2018]
- Gibbins, J. (2004). *Making pulverized coal plant "capture ready": methods and benefits*. 7th International CO₂ Capture Network Meeting, Vancouver, Canada. March 2004.
- Gibbins, J., Lucquiaud, M., Li, J., Lord, M., Liang, X., Reiner, D. and Sun, S. (2006). *Capture ready fossil fuel plants: definitions, technology options and economics*. Proc. 7th European Gasification, 25-27 Apr 2006, Barcelona, Spain.
- He, K. & Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, pp. 1022-1039.
- IEA (2007). *Tracking industrial energy efficiency and CO₂ emissions*. Paris, France. Available at: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/tracking_emissions.pdf [Accessed September 28, 2018]
- IEA (2011). *Technology Roadmap – Carbon Capture and Storage in Industrial Applications*. Available at: <http://hub.globalccsinstitute.com/sites/default/files/publications/22002/ccs-industry-roadmap-web.pdf> [Accessed July 20, 2018]
- IEA (2013). *CCS in Industrial Applications. A workshop of the CCUS Action Group in Preparation for the 4th Clean Energy Ministerial*. London, UK. Available at: http://www.iea.org/media/workshops/2013/ccs/industry/cem_workshopreport.pdf [Accessed July 19, 2018]

- IEAGHG (International Energy Agency Greenhouse Gas Programme) (2007). *CO₂ Capture Ready Plants*. [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO₂_Capture_Ready_Plants.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/CO2_Capture_Ready_Plants.pdf) [Accessed April 22 2018]
- IEAGHG (2018). *Cost of CO₂ Capture in the Industrial Sector: Cement and Iron and Steel Industries*. 2018-TR03, September. <http://documents.ieaghg.org/index.php/s/YKm6B7zikUpPgGA?path=%2F2018%2FTechnical%20Reviews> [Accessed October 25, 2018]
- IPCC (2007). *Fourth Assessment Report: Climate Change 2007 (AR4): Work Group III: Mitigation of Climate Change*. Available at: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch7s7-4-1.html [Accessed September 30, 2018]
- Iwasa, K., Hodotsuka, M., Zhao, X., & Suzuki, K. (2016). Application of Carbon Capture to CO₂ Emissions of Steel Plants. *Clean Coal Technology and Sustainable Development*, pp. 353-358. Springer, Singapore.
- Li, J., Liang, X., Gibbins, J., Reiner, D., (2012). *Chinese Advanced Power Plant Carbon Capture Options (CAPPCCO)*. Published by UK Department of Energy and Climate Change. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/66052/7476-cappcco-final-summary-report-march-2012-.pdf [Accessed November 2, 2018]
- Liang, X., Reiner, D., Gibbins, J., Li, J. (2009). Assessing the Value of CO₂ Capture Ready in New-build Pulverised Coal-fired Power Plants in China. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 3, pp. 787-792.
- Lu, D., Wang, L., Ren, L., Jia, Z., LIN, Q., LIANG, X., Muslemani, H., Jiang, M., Ascui, F., (2018). *Lower Carbon Technology Approaches for Steel Manufacturing in China (Draft Report)*. Working Paper 4.7 for the BHP Industrial CCS Project 'Unlocking the Potential of CCUS for Steel Production in China'. North China Electric Power University, UK-China (Guangdong) CCUS Centre and the University of Edinburgh, Edinburgh.
- NDRC (National Development and Reform Commission) (2013). Greenhouse Gas Auditing Methodology and Reporting Guideline for Iron and Steel Production Companies in China (Trial). http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201311/t20131101_565313.html [Accessed September 22, 2018]
- NRDC (Natural Resources Defense Council) (2004). *Clean Power, in NRDC's China Clean Energy Project*. Available at: <http://www.nrdc.org/air/energy/china/cleanpower.asp> [Accessed July 12, 2018]
- Progressive Energy Limited (2015). *TVU CCS Pre-FEED: WP1 – SSI Process Study: Optioneering & Screening Report*. Document Nu: 16202312/9001-X01-0001.
- ULCOS (2013). *CCS for Iron and Steel Production*. Available at: <https://www.globalccsinstitute.com/insights/authors/dennisvanpuyvelde/2013/08/23/ccs-iron-and-steel-production> [Accessed September 30, 2018]
- Wilson, M. and Gibbins, J. (2005). *Getting Ready for Carbon Capture and Storage: Canada's Progress*. Energy INET Report.
- World Steel Association (2018). *Steel Statistical Yearbook*. Available at: <https://www.worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/steel-statistical-yearbook-.html> [Accessed November 4, 2018]