



**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

# 评估中国钢铁行业二氧化碳捕集经济可行性：案例研究



来源: [dp.pconline.com](http://dp.pconline.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

---

## 评估中国钢铁行业二氧化碳捕集的经济可行性： 案例研究

---

梁希<sup>1,2</sup>, 林千果<sup>1,3</sup>, 雷明<sup>4</sup>, 刘强<sup>5</sup>, 李佳<sup>2</sup>, WU Alisa<sup>3</sup>, 刘牧心<sup>2</sup>,  
ASCUI Francisco<sup>1</sup>, MUSLEMANI Hasan<sup>1</sup>, 江梦菲<sup>1</sup>

2018 年 10 月

<sup>1</sup> 爱丁堡大学商学院, 爱丁堡, 英国

<sup>2</sup> 中英（广东）CCUS 中心, 广东, 中国

<sup>3</sup> 中国华北电力大学, 北京, 中国

<sup>4</sup> 北京大学光华管理学院, 北京, 中国

<sup>5</sup> 国家应对气候变化战略研究和国际合作中心, 北京, 中国



# 目录

|                      |     |
|----------------------|-----|
| 免责声明.....            | III |
| 致谢.....              | IV  |
| 缩略词.....             | V   |
| 1 执行摘要.....          | 1   |
| 2 综述.....            | 2   |
| 3 钢铁制造工艺以及减排机制.....  | 5   |
| 3.1 不同的炼钢工艺.....     | 5   |
| 3.2 钢铁行业二氧化碳排放源..... | 9   |
| 3.3 潜在的减排技术.....     | 11  |
| 4 案例分析假设.....        | 13  |
| 4.1 技术假设.....        | 13  |
| 4.2 经济性假设.....       | 15  |
| 5 经济分析结果.....        | 18  |
| 6 结论与后续研究建议.....     | 20  |
| 参考文献.....            | 22  |

# 图表

图 1. 世界和中国钢铁生产（World Steel Association, 2016） .....3

图 2. 典型钢生产工艺流程图.....5

图 3. 烧结矿生产工艺流程图.....6

图 4. 球团矿生产工艺流程图.....7

图 5. 钢铁生产路线.....9

图 6. 典型钢厂的系统边界和二氧化碳排放源.....10

图 7. 不同贴现率下的二氧化碳减排成本.....19

# 表格

表 1. 中国 CCUS 政策文件 .....2

表 2. 粗钢总产量.....4

表 3. 2015 年国内粗钢生产及炼钢工艺，按企业分类 .....8

表 4. 钢铁生产过程中主要的二氧化碳来源.....11

表 5 宝钢湛江钢铁厂主要仪器设备.....14

表 6 编码工艺流程和子流程.....14

表 7 高炉烟气流成分估算.....15

表 8. 捕集系统总投资.....17

表 9. 燃料和消费品变量成本.....17

表 10. 捕集设施运营成本.....18

表 11. 中国 50 万吨级 CCUS 项目的假设现金流模型.....19

# 免责声明

除另有声明外，本刊物版权归爱丁堡大学商学院、华北电力大学及中英（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](mailto:ccus@business-school.ed.ac.uk).

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，它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 Ayesha Sodha 女士对项目开发支持。感谢宝武钢铁和山东钢铁提供的相关信息。

## 引用格式

Liang X, Lin Q, Lei M, Liu Q, Li J, Wu A, Liu M, Ascui F, Muslemani H, Jiang, M. 2018. Assessing the economics of CO<sub>2</sub> capture in China's iron/steel sector: a case study. Working Paper 4.8 for the BHP Industrial CCS Project 'Unlocking the Potential of CCUS for Steel Production in China'. The UK-China (Guangdong) CCUS Centre and the University of Edinburgh, Edinburgh.

# 缩略词

|        |                                                                      |
|--------|----------------------------------------------------------------------|
| ASPEN  | Advanced System for Process Engineering 过程工程的先进系统                    |
| ASU    | Air Separation Unit 空气分离装置                                           |
| BF     | Blast Furnace 高炉                                                     |
| BFC    | Blast Furnace Capture 高炉捕集                                           |
| BOF    | Basic Oxygen Furnace 氧气顶吹转炉                                          |
| BSZ    | Bao Steel Zhanjiang 宝钢湛江钢厂                                           |
| CCS    | Carbon Capture and Storage 碳捕集与封存                                    |
| CCUS   | Carbon Capture, Utilisation and Storage 碳捕集利用与封存                     |
| CFP    | Lifecycle Incremental Cost for Steel Product<br>钢产品的生命周期增量成本         |
| CNE    | China Emissions Exchange 中国碳排放交易                                     |
| COA    | Cost of CO <sub>2</sub> Avoidance 避碳成本                               |
| DRI    | Direct Reduced Iron 直接还原铁                                            |
| EAF    | Electric Arc Furnace 电弧炉                                             |
| IEA    | International Energy Agency 国际能源署                                    |
| INDC   | China's Intended Nationally Determined Contribution<br>中国国家自主贡献      |
| IPCC   | Intergovernmental Panel on Climate Change<br>政府间气候变化专门委员会            |
| MCC    | Metallurgical Group Corporation 冶金集团公司                               |
| MOST   | Ministry of Science and Technology 科技部                               |
| NDRC   | National Development and Reform Commission<br>国家发展和改革委员会             |
| OHF    | Open-hearth Furnace 平炉                                               |
| PSA    | Pressure Swing Adsorption 变压吸附                                       |
| TSA    | Temperature Swing Adsorption 变温吸附                                    |
| UNFCCC | United Nations Framework Convention on Climate Change<br>联合国气候变化框架公约 |

## 1 执行摘要

本研究旨在形成中国现代钢铁生产工厂理论首个二氧化碳捕集和封存项目的技术经济分析。它假定使用胺法来捕集相对高浓度的铁制造过程中的二氧化碳排放。该项目的技术配置是使用过程工程的先进系统（ASPEN）和财务模型结合建模。分析表明：

- 假设一个典型 CCS 钢铁碳捕集项目，每年减排 50 万吨二氧化碳（0.5 MtCO<sub>2</sub>/年），并且采用管道运输和进行咸水层封存，其项目成本为每吨 CO<sub>2</sub> **442.54 元（约 63.22 美元）**。
- 假设项目以 90%容量（0.45 MtCO<sub>2</sub>/年）运行 25 年，将捕集到 1125 万吨二氧化碳（11.25 MtCO<sub>2</sub>）。然而，部分捕集到的二氧化碳会被能耗增加产生的排放所抵消，因此该项目每年减排二氧化碳总量仅为 40 万吨每年（0.40 MtCO<sub>2</sub>/年），或在其生命周期内总计减排 993 万吨二氧化碳（9.93 MtCO<sub>2</sub>）。
- 当项目成本仅分摊到与 993 万吨二氧化碳（9.93 MtCO<sub>2</sub>）（占钢铁总产量的 2.6%）相关的钢量时，成本为每吨钢 **730.19 元（约 104.31 美元）**。然而，如果成本分摊到工厂的整个生产过程中，生产成本仅为 **18.74 元（约 2.68 美元）每吨**。
- 避碳成本受许多假设影响，包括贴现率和二氧化碳运输和封存的成本。在考虑到宝钢的资金成本和二氧化碳捕集项目的风险的前提下，假设捕集项目的贴现率为 12%。如果一个项目被认为是一个适度的风险投资，并且贴现率为 8%，那么二氧化碳避免的成本（即减排成本）将从 **442.54 元（约 63.22 美元）每吨二氧化碳减少到 407.56（约 58.22 美元）元每吨**。如果该项目能与其他大型固定排放源共享基础设施，那么运输和存储成本假设可能会更低。
- 虽然成本假设是普适的，但未来的学习和升级可能会使成本最小化，然而目前钢铁行业的衰退环境不太可能在没有外部支持的情况下承担这样一个项目的额外成本。我们建议，应用研究的下一步应该是政府和企业创新理念的结合，为示范项目提供必要的财政支持。

## 2 综述

2015 年 12 月达成的《巴黎协定》制定了全球行动计划以避免危险的气候变化，通过抑制全球变暖将长期温度上升限制在较工业化前水平 2 摄氏度以内，并尽最大努力将温度上升限制在 1.5 摄氏度以内（UNFCCC, 2015:p. 2）。2 摄氏度目标相当于大量并快速将全球人均排放量每年 7 吨二氧化碳在 2030 年降到 4 吨，2050 年降至 2 吨（ADB, 2015）。国际能源署 IEA（2015）指出，CCS（碳捕集与封存）技术可以在 2010 年至 2050 年间减少 13% 的温室气体排放。

表 1. 中国 CCUS 政策文件

| 年份   | 机构            | CCUS 相关政策文件                  |
|------|---------------|------------------------------|
| 2006 | 国务院           | 国家中长期科学技术发展规划纲要（2006 – 2020） |
| 2007 | 科技部           | 中国国家气候变化项目                   |
| 2007 | 科技部、NDRC、外交部等 | 中国应对气候变化科技专项行动               |
| 2011 | 科技部社会科学技术司    | 中国的碳捕集、利用与封存技术路线图            |
| 2011 | 科技部           | 国家“十二五”科技发展规划                |
| 2011 | 国务院           | “十二五”温室气体排放控制工作规划            |
| 2012 | 国务院新闻办        | 中国能源政策（2012）白皮书              |
| 2012 | 国家能源局         | 煤炭产业“十二五”发展规划                |
| 2013 | 科技部           | “十二五”国家碳捕集利用与封存技术专项发展规划      |
| 2013 | NDRC          | 关于促进碳捕集、利用与封存示范的通知           |
| 2013 | 国务院           | 国务院关于加快发展节能环保产业的意见           |
| 2013 | 环境保护部         | 关于加强碳捕集、利用与封存试验示范项目环境保护工作的通知 |
| 2014 | 国务院办公厅        | 2014 - 2015 年低碳发展节能减排行动计划    |
| 2015 | 国务院新闻办        | 加强应对气候变化行动：中国国家自主贡献（INDCs）   |

来源: State Council, 2006; MOST, 2011; NDRC, 2012; MOST, 2013; GDCCUSC, 2016: p. 24

中国对《巴黎协定》中所制定的国家自主贡献（INDC）包括二氧化碳排放量在 2030 年达到顶峰（尽最大努力提早达到峰值），相比 2005 年水平，到 2030 年降低 60-65% 单位 GDP 二氧化碳排放量，并提高非化石能源占一次能源消费比重 20% 左右（NDRC, 2015a:p. 5）。INDC 概述了一系列低碳技术和减少温室

气体排放的机制，包括建立一个全国性的碳市场。碳捕集、利用与封存（CCUS）被列为重点低碳技术（NDRC, 2015b:p. 8）。中国政府在各种政策机制支持碳捕集、利用和封存方面已有十年的经验（见表 1）。

钢铁行业为社会提供了基础原料，但钢铁行业也是能源和碳密集型行业之一，是全球人为二氧化碳排放的主要排放源（Leeson et al., 2014）。根据政府间气候变化专门委员会（IPCC）的第五份评估报告，2006 年钢铁生产每年产生超过 26 亿吨二氧化碳（GtCO<sub>2</sub>），相当于全球人为二氧化碳排放量的 5%（IPCC, 2014; Fishedick et al, 2014）。

2015 年，全球粗钢产量达到 16 亿吨，比 2005 年的 11 亿吨增加了 41%（图 1 和表 2）。尽管 2015 年中国粗钢产量下降了 2%，但国际能源署估计，全球粗钢产量将出现长期增长。应用环保和低碳技术是全球钢铁行业未来的主要趋势（Sodsai and Rachdawong, 2012; Moya et al, 2013; Wen et al, 2014; Morfeldt et al, 2015; Riccardi et al, 2015; Tsai et al, 2015）。根据欧盟委员会（EU Commission）的低碳路线图预计，到 2050 年年底，全球每吨粗钢的排放强度将低于每吨 0.2 吨，而欧盟目前的排放水平为每吨 1.3 吨以上，而中国 2014 年的平均二氧化碳排放量为 2.18 吨/吨粗钢（Zou, 2015）。该路线图建议，CCS 是实现钢铁行业更大规模减排的关键技术。

图 1. 世界和中国钢铁生产（World Steel Association, 2016）

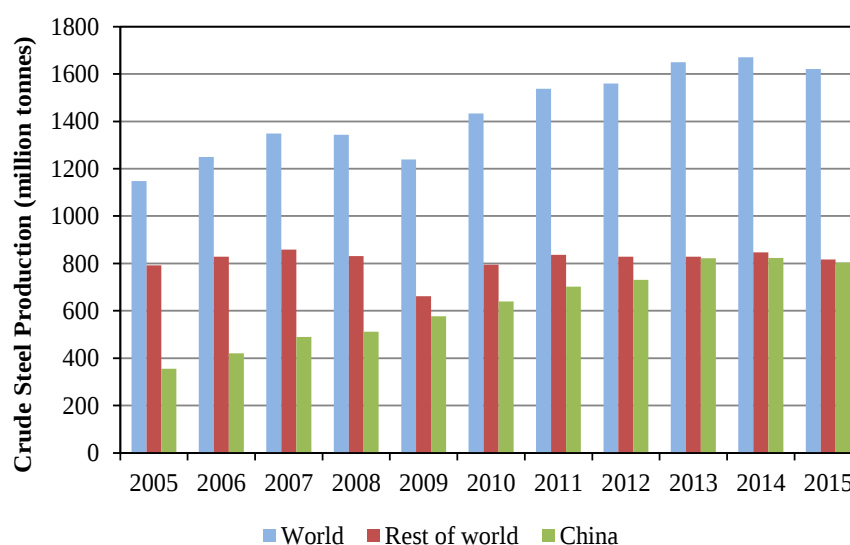


表 2. 粗钢总产量

| 区域和国家       | 2015（百万吨） | 2014（百万吨） | 2015/2014（%） |
|-------------|-----------|-----------|--------------|
| 欧盟（28 国）    | 165.3     | 169.3     | -2.42        |
| 欧盟 – 其它     | 35.7      | 38.4      | -7.56        |
| 独联体         | 102.1     | 106.1     | -3.92        |
| 北美          | 110.2     | 121.2     | -9.98        |
| <b>美国</b>   | 78.8      | 88.2      | -11.93       |
| 南美          | 43.9      | 45.0      | -2.50        |
| 非洲          | 13.0      | 15.0      | -15.38       |
| 中东          | 29.2      | 30.0      | -2.74        |
| 亚洲          | 1,113.6   | 1,139.7   | -0.02        |
| <b>中国</b>   | 803.8     | 822.8     | -2.36        |
| <b>日本</b>   | 105.2     | 110.7     | -5.23        |
| 大洋洲         | 6.5       | 5.5       | 15.38        |
| <b>澳大利亚</b> | 4.9       | 4.6       | 6.12         |
| <b>新西兰</b>  | 1.6       | 0.9       | 43.75        |
| 全球          | 1,620.9   | 1,669.9   | -3.02        |

来源: World Steel Association (2015; 2016); The Editorial Board of China Steel Yearbook (2015)

目前世界上只有两个正在开发的大型钢铁行业一体化 CCS 项目：超低二氧化碳钢铁联盟（UCLOS）高炉项目和阿联酋钢铁工业 CCS 项目（GCCSI，2016）。UCLOS 高炉项目旨在从位于法国的高炉燃气锅炉中每年捕集高达 70 万吨 CO<sub>2</sub>。阿联酋钢铁工业 CCS 项目正计划从直接还原铁（DRI）设施中每年捕集 80 万吨 CO<sub>2</sub>。尽管中国是全球最大的粗钢生产国，但它还没有任何钢铁行业 CCS 的示范项目。亚洲发展银行（ADB, 2015: 31）建议，中国新建钢厂应考虑 CCS 就绪设计。

因此，这份报告分析了假设中的中国钢铁厂二氧化碳捕集技术的技术经济性能。本报告结构如下：第 3 节概述了典型的钢铁制造过程，以及综述了该领域内潜在的减排机制。第 4 节概述了中国普通钢厂的技术和财务建模假设。第 5 节介绍了技术经济分析结果，然后是第六部分总结。

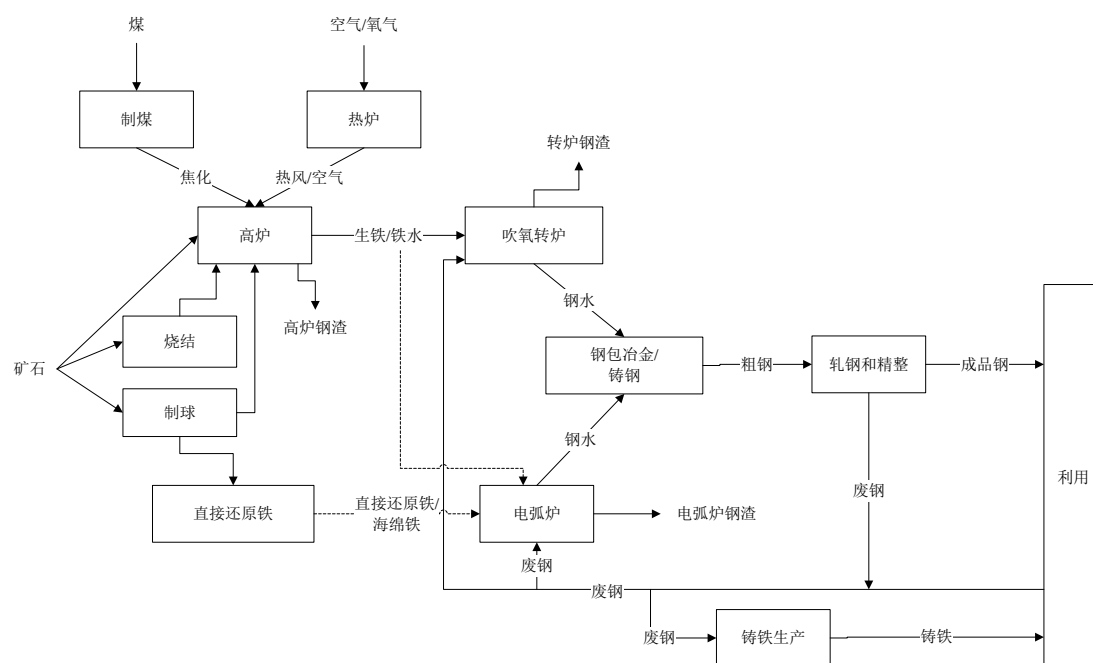
### 3 钢铁制造工艺以及减排机制

#### 3.1 不同的炼钢工艺

钢铁的生产分为两个主要阶段：（a）从铁矿石中提取生铁的冶铁过程；（b）将生铁提纯制成粗钢的炼钢过程。这两个阶段可以进一步分解为四个步骤（IEA, 2007; Carpenter, 2012），如图 2 所示：

- (i) 原料制备，即炼焦和铁矿石制备；
- (ii) 炼铁，即铁矿石由碳基试剂还原产生热金属（也称为“生铁”，在铸成锭时）或直接还原铁 DRI，一种固体产品；
- (iii) 炼钢，将热金属/生铁或还原铁转化为液态钢；
- (iv) 生产钢材，对钢材进行浇铸、再加热、轧制和加工。

图 2. 典型钢生产工艺流程图



铁矿石制备厂有两种：烧结厂和球团厂（分别为图 3 和图 4）。球团矿几乎总是由一种明确定义的铁矿石制成，或者集中在矿井中，然后转化为这种形式。烧结矿通常是由预备的细矿石、残渣和添加剂混合物（Hidalgo et al., 2003）所

制成的。在过去的 20 年里，尽管来自 DRI 的钢的份额稳步增长，几乎 60% 的钢铁都来自于热金属/生铁。生铁是在高炉中生产的。如今，全球约 5% 的钢材来自 DRI, 35% 的粗钢来自废钢。这些发展之所以重要，是因为它们对能源使用和二氧化碳排放具有显著的影响（IEA，2007）。

图 3. 烧结矿生产工艺流程图

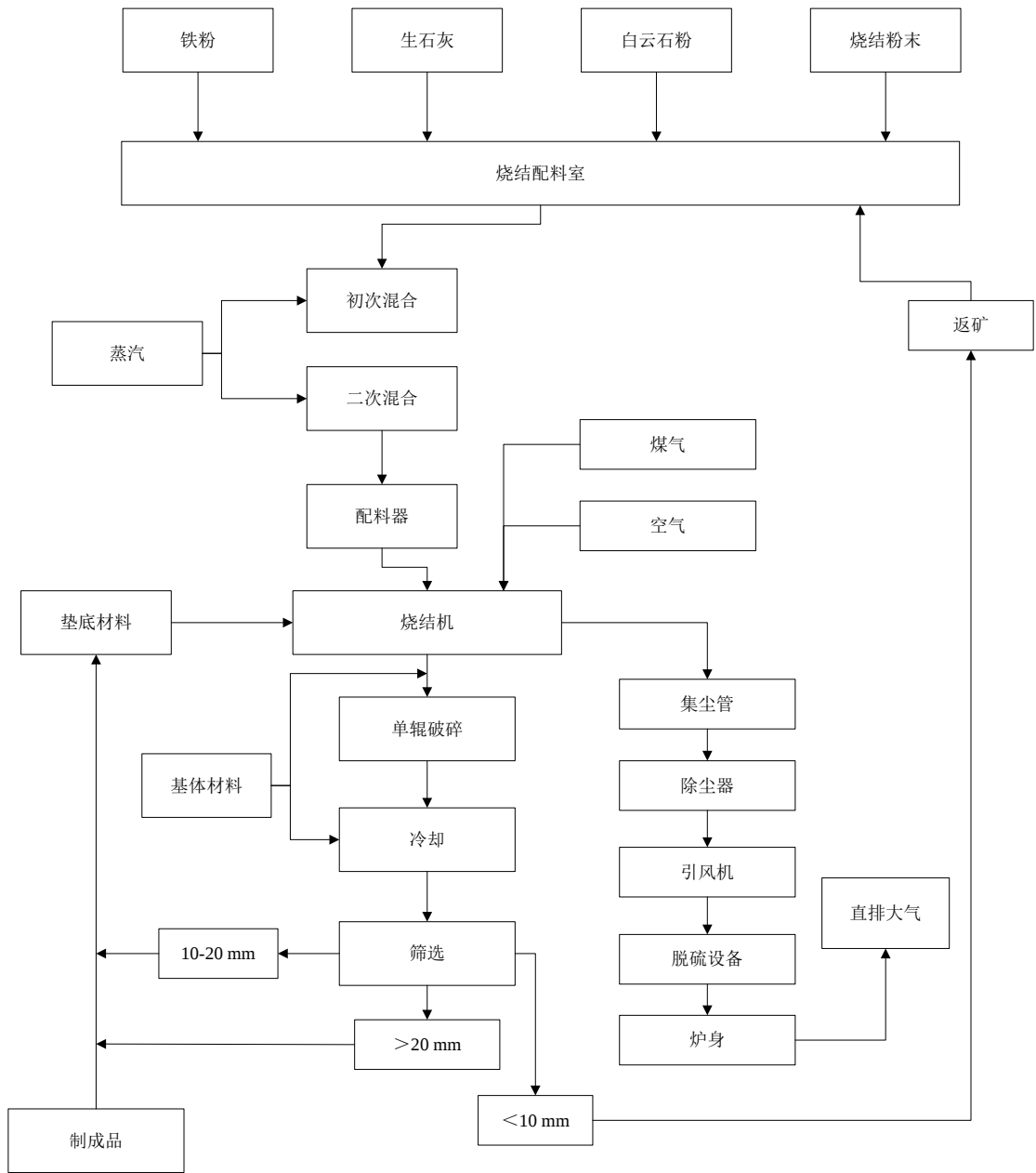


图 4. 球团矿生产工艺流程图

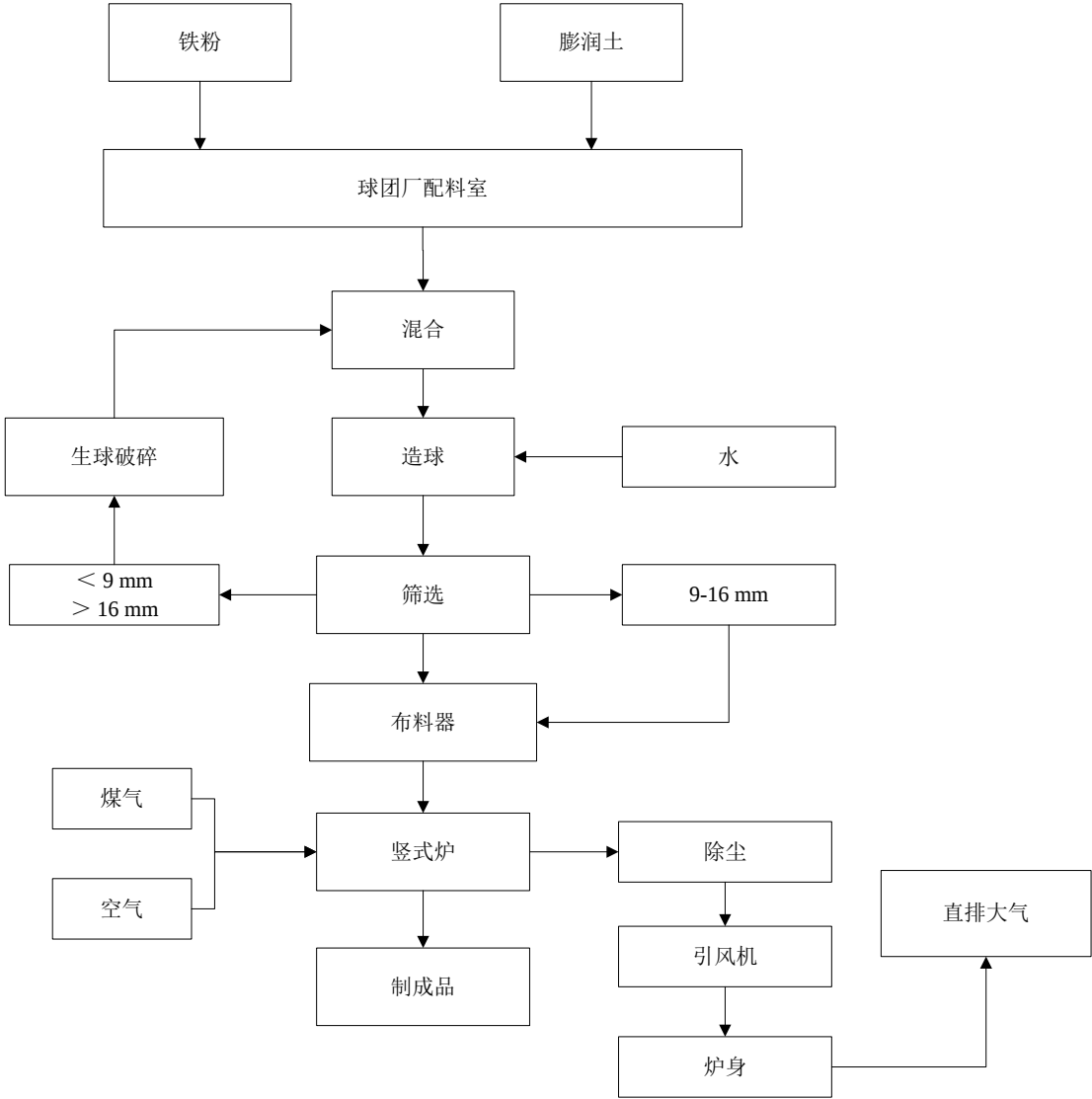


图 5 显示了炼铁和炼钢生产路线的简图。在全球范围内，生产钢铁的主要途径有两种：高炉基础氧炉路线（BOF）和电弧炉路线（EAF）。这些路线之间的关键区别在于它们消耗的原材料的类型。在 BOF 路线中，这些主要是铁矿石、煤炭和可再生钢（废钢），而 EAF 路线主要生产的是可再生钢。根据工厂结构回收钢的可得性，还可以在 EAF 路线中使用其他的金属铁，如 DRI 或热金属。BOF 路线总是使用一些废钢（高达 30%），而 EAF 可以用 100% 的废钢。另一种炼钢技术，平炉（OHF），约占全球钢铁产量的 1%。OHF 过程是高度能源密集型的，由于其环境 and 经济上的不利因素而在逐步淘汰。如表 3 所示，中国大部分钢厂采用 BOF 路线。

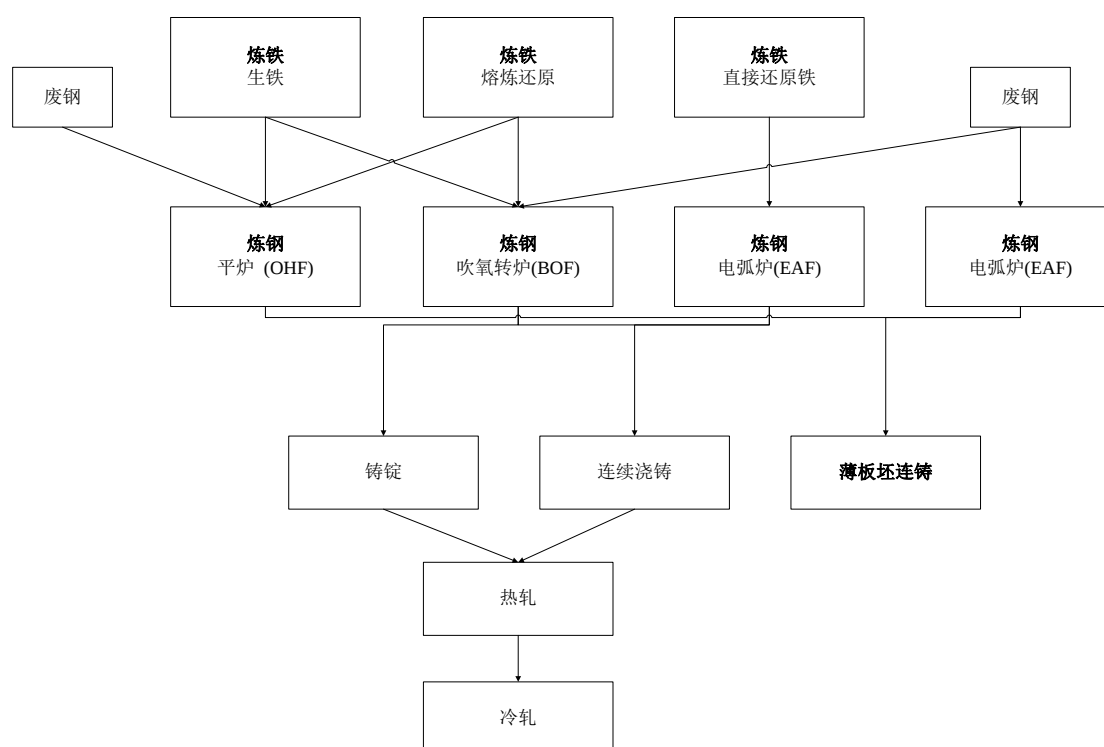
表 3. 2015 年国内粗钢生产及炼钢工艺，按企业分类

| 企业      |       | 地区     | 2015年粗钢产量<br>(百万吨) | 炼钢工艺     |
|---------|-------|--------|--------------------|----------|
| 河钢集团    | 唐山钢铁  | 河北     | 47.75              | BOF      |
|         | 邯郸钢铁  |        |                    | BOF      |
|         | 宣化钢铁  |        |                    | BOF      |
|         | 承德钢铁  |        |                    | BOF      |
|         | 舞阳钢铁  |        |                    | BOF      |
|         | 石家庄钢铁 |        |                    | EAF, BOF |
| 宝钢集团    |       | 上海     | 34.94              | EAF, BOF |
| 沙钢集团    |       | 江苏     | 34.21              | EAF, BOF |
| 鞍钢集团    |       | 辽宁     | 32.50              | BOF      |
| 首钢集团    |       | 河北     | 28.55              | BOF      |
| 武钢集团    |       | 湖北     | 25.78              | EAF, BOF |
| 山东钢铁集团  | 济南钢铁  | 山东     | 21.69              | BOF      |
|         | 莱芜钢铁  |        |                    | BOF      |
| 马鞍山钢铁公司 |       | 安徽     | 18.82              | EAF, BOF |
| 天津渤海钢铁  |       | 天津     | 16.27              | EAF, BOF |
| 建龙集团    | 天在建龙  | 湖北     | 15.14              | BOF      |
|         | 承德建龙  | 河北     |                    | BOF      |
|         | 黑龙江建龙 | 黑龙江    |                    | BOF      |
|         | 吉林建龙  | 吉林     |                    | BOF      |
|         | 抚顺新钢铁 | 辽宁     |                    | BOF      |
|         | 唐山新宝泰 | 湖北     |                    | BOF      |
| 本溪钢铁集团  |       | 辽宁     | 14.99              | EAF, BOF |
| 日照钢铁    |       | 山东     | 14.00              | BOF      |
| 方大 钢铁   |       | 江西     | 13.21              | BOF      |
| 包头钢铁    |       | 内蒙古自治区 | 11.86              | BOF      |
| 敬业钢铁    |       | 河北     | 11.32              | BOF      |
| 柳州钢铁    |       | 广西     | 10.83              | BOF      |
| 安阳钢铁    |       | 河南     | 10.74              | EAF, BOF |
| 纵横钢铁    |       | 河北     | 10.38              | EAF, BOF |
| 太原钢铁    |       | 山西     | 10.26              | BOF, EAF |
| 津西钢铁    |       | 河北     | 9.77               | BOF      |
| 三明钢铁    |       | 福建     | 9.58               | BOF      |
| 新余钢铁    |       | 江西     | 8.64               | BOF      |

|      |    |      |          |
|------|----|------|----------|
| 南京钢铁 | 江苏 | 8.59 | EAF, BOF |
| 国丰钢铁 | 河北 | 8.29 | BOF      |
| 酒泉钢铁 | 甘肃 | 7.69 | EAF, BOF |

来源： World Steel Association, 2016; Price et al., 2001; The Editorial Board of China Steel Yearbook, 2015.

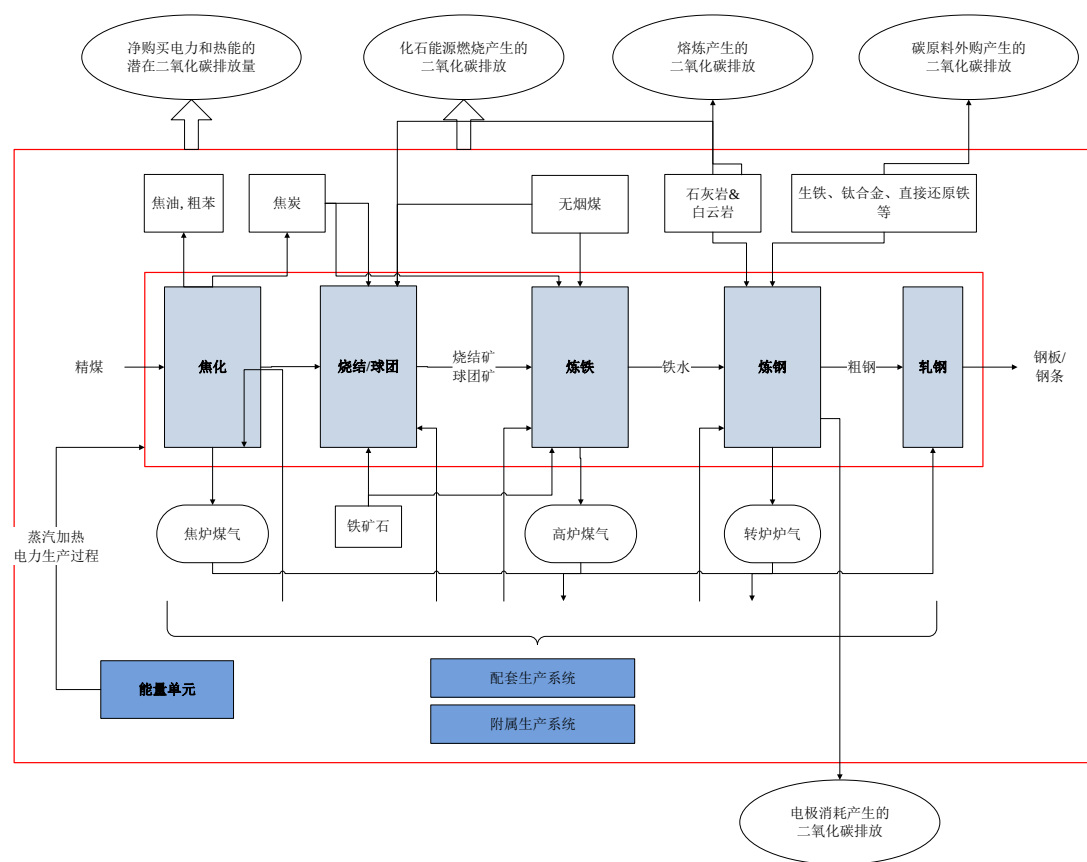
图 5. 钢铁生产路线



### 3.2 钢铁行业二氧化碳排放源

钢铁制造业占全球制造业二氧化碳排放量的最大比例。二氧化碳排放量高的原因是钢铁生产的能源强度大、主要能源来源依赖煤炭以及钢铁产量大（Carpenter, 2012）。钢铁行业的平均二氧化碳浓度是每生产一吨钢会产生 1.9 吨二氧化碳（IEA, 2007; KUNDAK et al., 2009; Quaderet al., 2014）。不同的工艺路线下钢铁生产的碳排放强度有很大差异，从废钢/电弧炉（EAF）工艺约 0.4 tCO<sub>2</sub> 每吨粗钢，一体氧气顶吹转炉（BOF）工艺的 1.7 - 1.8 tCO<sub>2</sub> 每吨粗钢，到煤基直接还原铁（DRI）工艺的 2.5 tCO<sub>2</sub> 每吨粗钢（Carpenter, 2012; Ruijven et al, 2016）。

图 6. 典型钢厂的系统边界和二氧化碳排放源



炼铁过程是钢铁生产中二氧化碳排放最密集的部分，排放量达到 70-80%。生产铁矿石需要与还原剂（如焦煤）发生反应，焦煤会产生大量二氧化碳。钢铁厂附近的主要河流含有高浓度的二氧化碳。图 6 为典型钢厂的系统边界和二氧化碳排放源。钢铁厂的系统边界由以下工序组成：炼焦厂、烧结厂、炼铁、炼钢和轧钢厂。此外，厂址的系统边界包括在厂址生产电力的能源单元、加工蒸汽和热量以及能源的购买和销售。过程气体，如焦炉气体和高炉气体，用于工厂现场的能源生产（Siitonen et al., 2010; Jin et al, 2015; Lisienko et al., 2015）。这项研究没有考虑到其他非厂房现场的排放，但是对钢铁行业的二氧化碳排放进行进一步的归果分析是有益的（Huang et al, 2010）。

在钢铁生产过程中的二氧化碳排放包括：(1)化石燃料的现场燃烧直接排放；(2)加工相关（即非能源）排放；(3)生产过程中所消耗的电力间接排放（表 4）。产生直接二氧化碳排放的主要设备有烧结机、焦炉、干淬炉、高炉、转炉、

连铸机、轧机、立窑、回转窑、发电锅炉（Carpenter, 2012; Zhang et al, 2013a; Zuo et al, 2013; GB/T 32151.5-2015）。

表 4. 钢铁生产过程中主要的二氧化碳来源

| 过程      | 二氧化碳源         |
|---------|---------------|
| 烧结/球团   | 固体燃料，点火气体，煅烧  |
| 炼焦      | 精煤、焦炉加热燃料等    |
| 炼铁      | 炼焦还原铁工艺，热风炉消耗 |
| 炼钢      | 铁水脱碳          |
| 连铸-冷/热轧 | 热处理使用燃料       |

### 3.3 潜在的减排技术

根据不同钢铁生产过程的二氧化碳排放顺序，钢铁行业减少二氧化碳排放的途径可分为以下三类：

- (1) **碳源**（改用较低的二氧化碳排放系数燃料）；
- (2) **碳排放最小化**（例如，尽量减少能源消耗，并提高基础工序的能源效率）；  
以及
- (3) **碳汇**（收集二氧化碳并储存在地下）（Xu and Cang, 2010; Hasanbeigi and Price, 2012; Xu et al, 2013; Quader et al., 2014; Carpenter, 2012）。

基于碳源的减排理念是采用低碳含量的燃料和/或还原剂。使用“零碳”或“低碳”能源载体（如风能、核能、水力、生物量、燃料电池等）代替化石燃料可以防止二氧化碳的排放。通过减少化石燃料的使用，可以减少二氧化碳的排放（Quader et al., 2014; Mousa et al, 2016）。煤可以被取代的程度取决于制铁的过程。一般来说，直接还原过程可以在反应器内（旋转窑、旋转炉）或将生物质气化而不是煤，并将产生的合成气注入竖炉中（Carpenter, 2012）。已经开发出了直接使用非焦煤（块状、细粒或颗粒）减少熔炼的工艺，从而消除了对焦炉和烧结矿厂的需要以及相关的二氧化碳排放。

另一条去碳化的途径是利用节能技术将钢铁厂排放的二氧化碳降至最低。这需要提高能源转换、运输和利用的效率（Quader et al., 2014）。提高能源效

率的主要措施包括加强连续过程以减少热量损失，增加能源和过程气体的回收，以及有效设计（Carpenter, 2012）。多年来，钢铁工业通过提高能源效率、减少焦炭和煤炭消耗、利用副产品燃料、增加生物质能和可再生能源的使用以及实施其他技术，作出了大量努力，以减少能源消耗和降低二氧化碳排放。

第三种关注的是碳汇。其概念是将排放的二氧化碳回收或捕集排放的二氧化碳，然后将其储存在永久的碳汇中，而不是释放到大气中（Quaderet al., 2014）。除了提高能源效率所带来的上述减排之外，还具有进一步减排的巨大潜力，必须通过向电厂提供碳捕集与封存设备才能实现这一目标（Ghanbari, 2015）。在有空间的前提下，在钢铁厂的所有烟囱上应用 CCS 是可能的（Carpenter, 2012; Burchsrt-Korol et al., 2016; Kuramochi, 2016）。它不会中断上下游过程，但运输和封存二氧化碳的成本相对较高。该研究将分析一种以胺为基础的技术，用于在钢高炉中捕集二氧化碳。基于胺的技术是全球最流行的碳捕集技术之一，也被认为是一种有成本效益的方法。它在石油和化学工业中已经应用了 60 多年——用于从气体流中去除硫化氢和二氧化碳。在商业上，它是最成熟的二氧化碳捕集技术，尽管实践经验主要存在于气体流（与烟气流的氧化性质相反，气体流的化学还原）。利用该技术，二氧化碳回收率可达 98%，产品纯度可达 99% 以上（H Liang et al, 2010）。

固体吸附剂如沸石和活性炭，可以用于从气体混合物中分离二氧化碳。在变压吸附（PSA）中，气体混合物在高压下通过一个充满的吸附剂层，直到理想气体浓度接近平衡。吸附剂层是通过降低压力而再生的。在变温吸附（TSA）中，通过提高吸附剂的温度使吸附剂再生。PSA 和 TSA 是商业应用的气体分离方法，在某种程度上被用于制氢和从天然气中去除二氧化碳。然而，由于现有吸附剂的容量和二氧化碳选择性较低，对于大规模的二氧化碳分离，吸附法还未能引起相应的关注，但它可能与另一种捕集技术相结合可以达到更好的效果（Qiang Wang et al, 2011）。气体分离膜使气流中的一个组分比其他组分通过得快。气体分离膜有多种类型，包括多孔无机膜、钯膜、聚合物膜和沸石。膜通常不能实现高度的分离，因此有必要进行多个阶段和/或循环利用。这导致了复杂性、能耗和成本的增加（Sanders et al, 2013）。

本报告还研究了氨捕集（Han et al, 2014）、水气转移技术（Dijk et al, 2015）、改造高炉燃烧前捕集（Onarheim and Arasto, 2016）和钙循环（Mattila et al, 2014）等其他具有潜在颠覆性的技术（Ravelli, 2015; Cormos, 2016）。然而，基于胺的技术仍然是钢铁行业碳捕集的最佳选择，不仅因为它的捕集效率，还因为它的经济效率。

## 4 案例分析假设

### 4.1 技术假设

本研究以宝钢湛江钢铁厂（BSZ）为研究对象，通过高炉（BF）途径评估通用粗钢生产厂的碳捕集和封存的经济性（Bao Steel, 2016a; Bao Steel, 2016b）。假设一个理论改造项目能够从高炉的滑流中捕集 50 万吨 CO<sub>2</sub> /年。该研究假设应用成熟的胺法燃烧后 CO<sub>2</sub> 捕获技术。

宝钢湛江钢铁厂是中国设计最先进的钢厂之一，布局紧凑，包括废旧金属回收集成单元和污染控制单元。该厂位于广东省西部湛江市东海岛，占地 12.98 平方公里。与发展阶段的石油化工中石化-科威特项目同处一地。宝钢湛江钢铁厂于 2016 年 7 月竣工，总资本投资额人民币 500 亿元（约 7.1 亿美元），年产量 938 万吨钢材（448 万吨热铸件和 490 万吨冷铸件）。该厂是由中国冶金集团公司（MCC）设计，项目主要设备详见下表 5。

在本研究中，高炉综合炼钢过程包括六个模块，并使用了 ASPEN 评估宝钢湛江钢铁厂的财务假设。ASPEN 是最先进的过程模拟器和经济评价软件，用于工程化石能源转化工艺。软件系统可以运行稳定的物料与能量平衡，确定设备尺寸和成本，并进行初步经济评价。本评估采用 IEA GHG（2013a 和 2013b）和 Tsupari 等人（2013, 2015）研究的方法，模块被编码并用于仿真和成本分析，如表 6 所示。本研究没有对 CO<sub>2</sub> 封存工程设计进行假设，但基于成本目的，封存被编码为 BF800。

表 5 宝钢湛江钢铁厂主要仪器设备

| 设备名称    | 规模                        | 数量 |
|---------|---------------------------|----|
| 高炉      | 5050 m <sup>3</sup>       | 2  |
| 旋转炉     | 350 吨                     | 3  |
| 双流板坯连铸机 | 2300mm                    | 1  |
| 双流板坯连铸机 | 1650mm                    | 1  |
| 钢带热轧机   | 2250mm                    | 1  |
| 钢带热轧机   | 1780mm                    | 1  |
| 薄纸板压铸机  | 4200mm                    | 1  |
| 钢带冷轧机   | 2030mm                    | 1  |
| 钢带冷轧机   | 1550mm                    | 1  |
| 原料装载站   | 3 百万吨装载量                  | 1  |
| 石灰厂     | 2 台滚动球磨机和 1 台固定球磨机, 84 万吨 | 1  |
| 燃煤燃气电厂  | 350MW 临界容量                | 2  |
| 空气分离装置  | 60,000 Nm <sup>3</sup> /h | 3  |
| 海水净化装置  | 15,000 吨/天                | 2  |

表 6 编码工艺流程和子流程

|                         |                 |
|-------------------------|-----------------|
| 原料准备 (编码: BF100)        | 石灰石生产 (BF110)   |
|                         | 烧结生产 (BF120)    |
|                         | 焦炭生产 (BF130)    |
| 制钢工艺流程 (BF200)          | 高炉 (BF210)      |
|                         | 热金属脱硫 (BF220)   |
| 炼钢生产线 (BF300)           | 碱性氧气炼钢 (BF310)  |
|                         | 二次炼钢 (BF320)    |
| 铸件 (BF400)              | 连铸机 (高炉 410)    |
| 精轧机 (BF500)             | 再热 (BF510)      |
|                         | 连动 (BF520)      |
| 其他辅助, 例如电站和空分单元 (BF600) | 空气分离装置 (BF610)  |
|                         | 燃煤电厂 (BF620)    |
|                         | 废金属回收装置 (BF630) |
|                         | 处理单元 (BF640)    |
| 高炉捕集 (BF700)            | 烟气净化流程 (BF710)  |
|                         | 捕集模型 (BF720)    |
|                         | 压缩模型 (BF730)    |

据估计，高炉烟气中的 CO<sub>2</sub> 约为 20% 浓度（Zhang et al., 2013b）。含 CO<sub>2</sub> 烟气从高炉顶部通入气体净化流程（BF710），净化的烟气进入胺基化学吸收模块（BF720），捕集到的高纯度 CO<sub>2</sub> 经压缩储存后再进行输送用于封存。剩余的富含 H<sub>2</sub> 和 CO 的烟气通过燃气加热器回到高炉底部进行循环使用。高炉烟气的成分详见表 7。

表 7 高炉烟气流成分估算

| 高炉气体                | 单位                 | 含量   |
|---------------------|--------------------|------|
| CO <sub>2</sub>     | % (v/v) 干基         | 20%  |
| CO                  | % (v/v) 干基         | 25%  |
| H <sub>2</sub>      | % (v/v) 干基         | 3%   |
| N <sub>2</sub> /Air | % (v/v) 干基         | 49%  |
| H <sub>2</sub> S    | mg/Nm <sup>3</sup> | 10   |
| Particulate Matter  | mg/Nm <sup>3</sup> | 5    |
| Mn                  | mg/Nm <sup>3</sup> | 0.2  |
| Pb                  | mg/Nm <sup>3</sup> | 0.05 |
| Zn                  | mg/Nm <sup>3</sup> | 0.05 |

#### 4.2 经济性假设

该项目的经济型分析包括以下两个主要参数：

a) **减排成本**（COA，元/吨 CO<sub>2</sub>），如公式 3-1：

$$COA = \frac{\sum_{n=0}^T \frac{(I_n + O_n + F_n + S_n)}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^T \frac{(Q_n - A_n)}{(1+r)^n}} \quad (3-1)$$

公式中，

I<sub>n</sub>，n 年的投资费用，

O<sub>n</sub>，n 年的固定运营成本，

F<sub>n</sub>，n 年的变量运营成本，

S<sub>n</sub>，n 年的运输和封存成本，

Q<sub>n</sub>，n 年的 CO<sub>2</sub> 捕集总量，

$A_n$ ,  $n$  年为捕集和压缩  $\text{CO}_2$  提供蒸汽和电力的辅助发电站产生的  $\text{CO}_2$  总量

$r$ , 贴现率（即，预期收益率），和

$T$ , 生命周期

**b) 钢铁生产增量成本（CFP，元/吨），如公式 3-2:**

$$CFP = \frac{\sum_{n=0}^T \frac{(I_n + O_n + F_n + S_n)}{(1+r)^n}}{\sum_{n=0}^T \frac{\theta \cdot Y_n}{(1+r)^n}} \quad (3-2)$$

公式中

$I_n$ ,  $n$  年的投资费用，

$O_n$ ,  $n$  年的固定运营成本，

$F_n$ ,  $n$  年的变量运营成本，

$S_n$ ,  $n$  年的运输和封存成本，

$Y_n$ ,  $n$  年的粗钢产量，

$r$ , 贴现率（即，预期收益率）

$\theta$ , 除以钢铁厂不进行捕集的钢总  $\text{CO}_2$  排放的  $\text{CO}_2$  减排分数，和

$T$ , 生命周期

捕集设施的资本成本预估 3.6 亿元（约 5100 万美元），其中 7% 为业主成本的保证金（表 8.）。此外，2000 万元（约 290 万美元）作为公司监督项目发展的运营成本，以及一次性 200 万元（约 29 万美元）启动资金。模拟结果表明，辅助发电站（产生蒸汽和电力用于捕获、压缩和存储）的电力输出损耗为 142kWh/tCO<sub>2</sub>（表 8.）。假设煤炭价格为人民币 27 元/GJ（约 4 美元/GJ），则包含辅助电源成本的电价为 0.48 元/kWh（约 7 美分/kWh），比广东基准趸售电价高约 10%。购买溶剂的成本是 40000 元/吨（约 5714 美元/吨）胺液。固定的运维成本假设为 1200 万元/年（约 170 万美元/年）（表 10.）。

表 8. 捕集系统总投资

| 捕集系统的成本构成 | 百万元    |
|-----------|--------|
| 工厂成本      | 360.0  |
| 业主成本      | 25.2   |
| 运营成本      | 20.0   |
| 筹备费用      | 2.0    |
| 总投资       | 407.20 |

表 9. 燃料和消费品变量成本

| 变量成本构成                                      |       |
|---------------------------------------------|-------|
| 胺成本（元/吨）                                    | 40000 |
| 胺耗（kg/tCO <sub>2</sub> ）                    | 1.2   |
| 电价（元/kWh）                                   | 0.48  |
| 电耗（kWh/tCO <sub>2</sub> ）                   | 142   |
| 废胺处理（元/吨胺）                                  | 500   |
| 水价（元/吨）                                     | 6.5   |
| CO <sub>2</sub> 运输与封存（元/吨 CO <sub>2</sub> ） | 112   |

考虑到宝钢资本成本和 CO<sub>2</sub> 捕集项目风险，捕集贴现率假设为 12%。在 11% 和 13% 折扣率情境下，进行了敏感性分析。假设钢厂现阶段每生产 1 吨钢材将排放 1.65 吨 CO<sub>2</sub>（基于已报道的主要钢铁厂排放平均值），年度 CO<sub>2</sub> 总排放量为 1550 万吨。辅助电厂排放因子为 743g CO<sub>2</sub>/kWh。因此，每年捕集 CO<sub>2</sub> 共 50 万吨时，总减排量为 397247 吨/年。<sup>1</sup>

假定捕集项目有 25 年寿命和 100% 的股权融资。。简化来说，假设捕集设施和高炉都将以每年 90% 的容量系数稳定运行。根据市场调研，将运输和封存成本假设为人民币 112 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 16 美元/吨 CO<sub>2</sub>）。

<sup>1</sup> 电力输出损耗(kWh/tCO<sub>2</sub>)\* 500,000 tCO<sub>2</sub> \* 排放因子(gCO<sub>2</sub>/kWh) \* 10<sup>-6</sup>

表 10. 捕集设施运营成本

| 运营成本组成                  | 百万元   |
|-------------------------|-------|
| <b>固定运营成本</b>           |       |
| 维护                      | 2.00  |
| 人工                      | 7.80  |
| 保险和税                    | 1.00  |
| 其他运营维护成本                | 1.20  |
| 总计                      | 12.00 |
| <b>变量运营成本 (90%容量系数)</b> |       |
| 燃料                      | 34.08 |
| 胺                       | 24.00 |
| 废物处理                    | 0.30  |
| 水成本                     | 3.25  |
| 总计                      | 61.63 |

## 5 经济分析结果

本评估估算了在进行运输和封存时，捕集 50 万吨 CO<sub>2</sub> 的项目减排成本为人民币 442.54 元/吨 CO<sub>2</sub>（63.22 美元/吨 CO<sub>2</sub>）（表 11）。持续运行 25 年，该项目预计将每年捕集 45 万吨 CO<sub>2</sub>，共计捕集 1125 万吨。但是，部分捕集量将与增加能耗产生的排放量抵消，因此该项目每年减少的总排放量为 40 万吨 CO<sub>2</sub>，预计生命周期内的总减排量为 993 万吨。当以排放 993 万吨 CO<sub>2</sub>（占总钢产量的 2.6%）的钢产量为基数计算时，生产成本为人民币 730.19 元/吨（104.31 美元/吨）。如果以整个钢铁厂的总产量为基数进行成本计算时，其生产成本仅为 18.74 元/吨（2.68 美元/吨）。

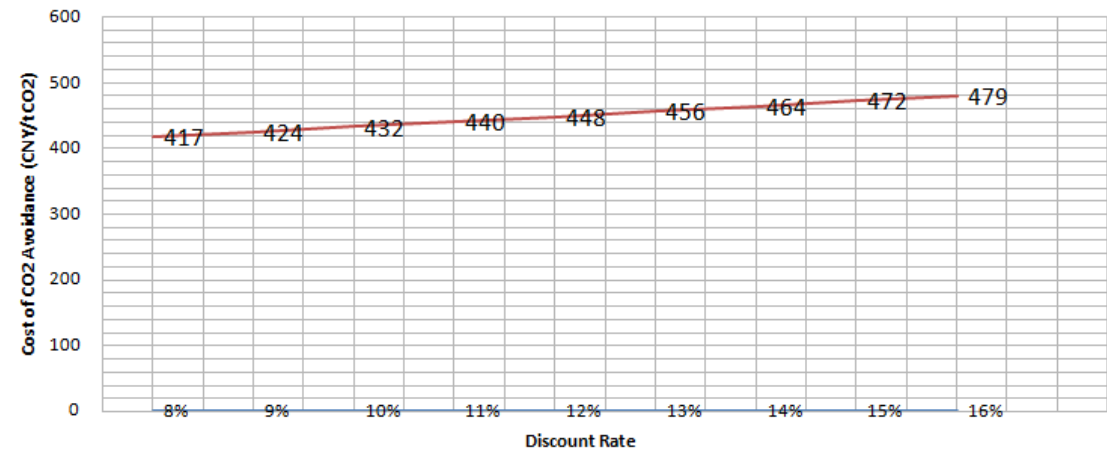
CO<sub>2</sub> 减排成本受多种假设的影响，包括贴现率和假设的 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本。假设一个项目的投资风险较低，贴现率为 8% 时，CO<sub>2</sub> 的减排成本将从 442.54 元/吨（约 63.22 美元/吨）降到 407.56 元/吨（约 58.22 美元/吨）（图 7.）。相反，假设贴现率为 16% 时，减排成本将上升到为 480.14 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 68.59 美元/吨）。如果 CO<sub>2</sub> 运输和封存成本从 112 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 16 美元/吨）增加到

123 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 18 美元/吨），贴现率为 8%时，减排成本将上升到 443.96 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 63.42 美元/吨）。

表 12. 中国 50 万吨级 CCUS 项目的假设现金流模型

| 产出                              | 结果      |
|---------------------------------|---------|
| <i>中间产出</i>                     |         |
| 折现后的减排二氧化碳量(百万吨)                | 3.12    |
| 折现后的“零碳”钢铁产量(百万吨)               | 1.89    |
| 折现后的钢铁总产量(百万吨)                  | 73.57   |
| 折现后的现金流 (税前, 百万元)               | 1378.81 |
| <i>关键经济指标</i>                   |         |
| 二氧化碳减排成本 (元/吨 CO <sub>2</sub> ) | 442.54  |
| “零碳”排放的钢铁产量的增量成本(元/吨)           | 730.19  |
| 钢铁总产量的增量成本(元/吨)                 | 18.74   |

图 7. 不同贴现率下的二氧化碳减排成本



澳大利亚钢铁行业 CCS 研究表明，去除运输和封存成本，传统胺法捕集技术的减排成本在 70-250 澳元（约 50-178 美元）之间（Wiley 等, 2011; Ho 等, 2013）。相比之下，中国的减排成本显著下降。与澳大利亚相比，中国降低每吨 CO<sub>2</sub> 减排成本的主要驱动力是降低其资本成本。广东是中国二氧化碳需求最大的省份，在工业和食品加工行业的二氧化碳需求超过 100 万吨（GCCSI，

2013)。销售 CO<sub>2</sub> 用于当地生产利用可以减少运输成本和抵消封存成本。然而，除非将捕集到的 CO<sub>2</sub> 代替自然开采的 CO<sub>2</sub> 用于当地消费，否则 CO<sub>2</sub> 利用并不会降低人为 CO<sub>2</sub> 排放。

## 6 结论与后续研究建议

本研究对中国钢铁厂的一个假定的 CCUS 项目进行了初步调查，并以广东湛江的现代化钢铁厂为技术和财务分析模型。初步发现该模型在折现率为 12% 时的减排成本为 **442.54 元/吨 CO<sub>2</sub> (约 63.22 美元/吨)**，经换算，模型的减排总量占钢厂产钢总量的 2.56%，成本为 730.19 元/吨钢（约 104.31 美元/吨）；当将成本分散在整个钢厂生产上时，成本为 18.74 元/吨钢（约 2.68 美元/吨）。虽然成本是适度的，且未来通过学习和规模扩大很可能会更大的降低成本，但在没有外部支持的情况下，钢铁行业在当前的衰退环境下不太可能承担该项目的额外成本。宝钢 2015 年的净利润率不到 1%，2014 年则不到 3%（宝钢, 2016b）。

为使钢铁行业 50 万吨 CO<sub>2</sub> 级 CCUS 示范项目经济可行，该假设模型提出了三个潜在机制：

- 为项目提供 442.54 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 63.22 美元/吨）的碳价补贴；
- 在市场上，将减排 36 万吨 CO<sub>2</sub> 生产的钢材定义为“零碳钢”，并向高附加值市场用户增加 730.19 元/吨钢（约 104.31 美元/吨）的溢价；或
- 为钢产量大于 844 万吨/年的钢厂，在年捕集高于 50 万吨时，提供 18.74 元/吨钢（约 2.68 美元/吨）的退税补贴。

报告发现，在没有任何支持的情况下，该项目需要 13.8 亿元现值的融资。目前广东 ETS 的碳价不足以支持示范项目的 442.54 元/吨 CO<sub>2</sub>（约 63.22 美元/吨）价格。目前广东 ETS 尚处于起步阶段，CO<sub>2</sub> 价格约为 15 元/吨 CO<sub>2</sub>（中国碳排放交易，2017）。基于全国 ETS 于 2017 年 12 月建立，CO<sub>2</sub> 价格预计会增加，并在未来保持稳定。除非成功开发新的商业模式或新的政策制度，否则，钢铁制造商也不可能承担向消费者示范 CCUS 的额外成本。

本研究选取了一个典型的现代化大型钢厂作为模型，但其局限性是研究结果可能并不适用于其他采用其他生产路线的钢厂，实际的成本的变化可能会高达 $\pm 40\%$ 。如果项目与其他大型固定排放源共用基础设施，则假定运输和封存成本可能会相对更低。还有其他潜在的可应用于钢铁厂 CCUS 的创新工艺和新型设计，例如利用  $\text{CO}_2$  代替吹炉，并没有在本研究中讨论到。

建议下一步应进行探索能够为示范项目提供必要的资金支持的政府与企业创新理念相结合的应用研究，包括向某些消费者推销“零碳”或“低碳”的钢铁产品，分配 ETS 拍卖所得的政府收入以支持示范项目，和/或更高的碳税调整。也应对其他的创新型和潜在突破性的捕集技术进行调查。实际通过捕集  $\text{CO}_2$  形成更高纯度的烟气流需要更少的捕集工艺和装置。因此，评估在混合煤气燃烧发电厂中提高烟道气纯度的优势，可以降低碳减排成本。

## 参考文献

- ADB (Asian Development Bank) (2015). *Roadmap for Carbon Capture and Storage Demonstration and Deployment in the People's Republic of China*. Available at: <https://www.adb.org/sites/default/files/publication/175347/roadmap-ccs-prc.pdf> [Accessed Aug 30, 2018]
- Baowu Steel. 2016a. *Baowu Steel Limited 2015 Annual Report*.
- Burchart-Korol, D., Pichlak, M. and Kruczek, M. (2016). Innovative technologies for greenhouse gas emission reduction in steel production. *Metalurgija*, 55(1), pp. 119-122.
- Carpenter, A. (2012). *CO<sub>2</sub> Abatement in the Iron and Steel Industry*. IEA Clean Coal Centre, pp. 7-100.
- CNE (China Emissions Exchange) (2017). *Update on Allowance Auctioning in Guangdong*. Available at: <http://www.cnemission.com/article/news/ssdt/201701/20170100001198.shtml> [Accessed Aug 30, 2018]
- Cormos, C. (2016). Evaluation of Reactive Absorption and Adsorption Systems for Post-combustion CO<sub>2</sub> Capture Applied to Iron and Steel Industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, pp. 56-64.
- Fischedick, M., Marzinkowski, J., Winzer, P. and Weigel, M. (2014). Techno-economic Evaluation of Innovative Steel Production Technologies. *Journal of Cleaner Production*, 84, pp. 563-580.
- GB/T 32151.5-2015. *Requirements of the greenhouse gas emission accounting and reporting -- Part 5: Iron and steel production enterprises*.
- GCCSI (Global CCS Institute) (2016). *The Global Status of CCS. Special Report: Introducing Industrial Carbon Capture and Storage*. Melbourne, Australia, pp. 14.
- GCCSI - Guangzhou Institute of Energy Conversion (2013). *Analysis of CO<sub>2</sub> Emission in Guangdong Province, China*. Guangdong, China, pp. 6-9.
- GDCCUSC (UK-China Guangdong CCUS Centre) (2016). *China Resources Power Haifeng Project Engineering Feasibility Study Report (August Draft Version)*.
- Ghanbari, H., Helle, M. and Saxén, H. (2015). Optimization of an Integrated Steel Plant with Carbon Capturing and Utilization Processes. *IFAC-PapersOnLine*, 48(17), pp. 12-17.
- Han, K., Ahn, C. K. and Lee, M. S. (2014). Performance of an Ammonia-based CO<sub>2</sub> Capture Pilot Facility in Iron and Steel Industry. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 27, pp. 239-246.
- Hasanbeigi, A. and Price, L. (2002). Emerging Energy-efficiency and Carbon Dioxide Emissions-reduction Technologies for the Iron and Steel Industry. *Seminars in Cell & Developmental Biology*, 13(3), pp. 217-224.

Hidalgo, I., Szabo, L., Calleja, I., Cisar, J. C. and Russ, P. (2003). *Energy Consumption and CO<sub>2</sub> Emissions from the World Iron and Steel Industry*. European Commission Joint Research Centre, Institute for Prospective Technological Studies, pp. 11-18.

Ho, M. T., Wiley, D. E. and Bustamante, A. (2013). Comparison of CO<sub>2</sub> Capture Economics for Iron and Steel Mills. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 19(21), pp. 145–159.

Huang, Z., Ding, X. and Sun, H. (2010). Analysis of Factors Influencing CO<sub>2</sub> Emissions in an Integrated Steel Works based on Life Cycle Analysis (LCA). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 30(2), pp. 444-448.

IEA (International Energy Agency) (2007). *Tracking Industrial Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions, Chapter 5 (Iron and Steel Industry)*. Paris, France: IEA, pp. 95-138.

IEA (International Energy Agency) (2015). *Carbon Capture and Storage: The solution for deep emissions reductions*. Paris, France: IEA.

IEA, 2017. Energy Technology Perspectives 2017- Catalysing Energy Technology Transformations. Available at: <https://www.iea.org/etp2017/> [Accessed 11/Oct/2018]

IEAGHG (International Energy Agency Greenhouse Gas Programme) (2013a). *Understanding the Economics of Deploying CO<sub>2</sub> Capture Technologies in an Integrated Steel Mill. Report 2013/04*.

IEAGHG (2013b). *Iron and Steel CCS Study (Techno-economics Integrated Steel Mill). Report 2013/TR3*, July 2013.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2014). *Working Group III: Mitigation of Climate Change, Chapter 10 (Industry)*.

Jin, P., Jiang, Z., Bao, C., Hao, S. and Zhang, X. (2015). The Energy Consumption and Carbon Emission of the Integrated Steel Mill with Oxygen Blast Furnace. *Resources Conservation & Recycling*, 75, pp. 561–574.

Kundak, A., Lazic, L. and Črnko, J. (2009). CO<sub>2</sub> Emissions in the Steel Industry. *Metalurgija*, 48(3), pp. 193-197.

Kuramochi, T. (2016). Assessment of Midterm CO<sub>2</sub> Emissions Reduction Potential in the Iron and Steel Industry: A Case of Japan. *Journal of Cleaner Production*, 132, pp. 81-97.

Leeson, D., Fairclough, J., Petit, C. and Fennell, P. (2014). *A Systematic Review of Current Technology and Cost for Industrial Carbon Capture*. Grantham Institute, Imperial College London.

Liang, H., Liu, Z., Wang, L., Li, P. and Yu, J. G. (2010). Capture of CO<sub>2</sub> from Flue Gases by a Combined Process of Vacuum and Temperature Swing Adsorption using 13X-APG Zeolite. *Chinese Journal of Process Engineering*, 10(2), pp. 249-255.

Lisienko, V. G., Lapteva, A. V., Chesnokov, Y. N. and Lugovkin, V.V. (2015). Greenhouse-gas (CO<sub>2</sub>) emissions in the Steel Industry. *Steel in Translation*, 45(9), pp. 623-626.

Mattila, H. P., Hudd, H. and Zevenhoven, R. (2014). Cradle-to-gate Life Cycle Assessment of Precipitated Calcium Carbonate Production from Steel Converter Slag. *Journal of Cleaner Production*, 84, pp. 611-618.

Morfeltdt, J., Nijs, W. and Silveira, S. (2015). The Impact of Climate Targets on Future Steel Production -- an Analysis based on a Global Energy System Model. *Journal of Cleaner Production*, 103, pp. 469-482.

MOST (Ministry of Science and Technology) (2011). *National "Twelfth Five-Year" Science and Technology Development Plan*. Available at: [http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/201107/t20110713\\_88230\\_6.htm](http://www.most.gov.cn/mostinfo/xinxifenlei/gjkjgh/201107/t20110713_88230_6.htm) [Accessed Aug 30, 2018]

MOST (2013). *Notice on subject plan of national CCUS technology development in Twelfth "Five-Year" Plan*. Available at: [http://www.most.gov.cn/tztg/201303/t20130311\\_100051.htm](http://www.most.gov.cn/tztg/201303/t20130311_100051.htm) [Accessed Aug 30, 2018]

Mousa, E., Wang, C., Riesbeck, J. and Larsson, M. (2016). Biomass Applications in Iron and Steel Industry: An Overview of Challenges and Opportunities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, pp. 1247-1266.

Moya, J. A. and Pardo, N. (2013). The Potential for Improvements in Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions in the EU27 Iron and Steel Industry under Different Payback Periods. *Journal of Cleaner Production*, 52, pp. 71-83.

NDRC (National Development and Reform Commission) (2012). *Notice on Twelfth "Five-Year" Plan of coal industry development*. Available at:

[http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201203/t20120322\\_585489.html](http://www.sdpc.gov.cn/zcfb/zcfbghwb/201203/t20120322_585489.html) [Accessed Sep 14, 2016]

NDRC (2015a). *Enhanced Actions on Climate Change: China's Intended Nationally Determined Contributions*. Available at: [http://qhs.ndrc.gov.cn/gwdt/201507/t20150701\\_710233.html](http://qhs.ndrc.gov.cn/gwdt/201507/t20150701_710233.html) [Accessed Sep 12, 2016]

NDRC (2015b). *National Key Category of Low-carbon Technologies*. Available at: [http://qhs.ndrc.gov.cn/zcfg/201512/t20151218\\_767903.html](http://qhs.ndrc.gov.cn/zcfg/201512/t20151218_767903.html) [Accessed Sep 11, 2016]

Onarheim, K. and Arasto, A. (2016). Staged Implementation of Alternative Processes in an Existing Integrated Steel Mill for Improved Performance and Reduced CO<sub>2</sub> Emissions – Part I: Technical Concept Analysis. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 45, pp. 163-171.

Quader, M. A., Ahmed, S., Ghazilla, R. R. and Ahmed, S. (2014). CO<sub>2</sub> Capture and Storage for the Iron and Steel Manufacturing Industry Challenges and Opportunities. *Journal of Applied Science and Agriculture*, pp. 60-67.

Ravelli, M. (2015). *CO<sub>2</sub> Capture in Integrated Steel Mills with the Innovative Ca-Cu Capture Process*. Milan: Politecnico di Milano.

Riccardi, R., Bonenti, F., Allevi, E., Avanzi, C. and Gundi, A. (2015). The Steel Industry: A Mathematical Model under Environmental Regulations. *European Journal of Operational Research*, 242, pp. 1017-1027.

Ruijven, B. J. van., Vuuren, D. P. van., Boskaljon, W., Neelis, M. L., Saygin, D. and Patel, M. K. (2016). Long-term Model-based Projections of Energy Use and CO<sub>2</sub> Emissions from the Global Steel and Cement Industries. *Resources, Conservation and Recycling*, 112, pp. 15-36.

Sanders, D. F., Smith, Z. P., Guo, R., Robeson, L. M., McGrath, J. E., Paul, D. R. and Freeman, B. D. (2013). Energy-efficient Polymeric Gas Separation Membranes for a Sustainable Future. *Polymer*, 54(18), pp. 4729-4761.

Siitonen, S., Tuomaala, M. and Ahtila, P. (2010). Variables Affecting Energy Efficiency and CO<sub>2</sub> Emissions in the Steel Industry. *Energy Policy*, 38(5), pp. 2477-2485.

Sodsai, P. and Rachdawong, P. (2012). The Current Situation on CO<sub>2</sub> Emissions from the Steel Industry in Thailand and Mitigation Options. *International Journal of Greenhouse Gas and Control*, 6, pp. 49-55.

State Council (State Council of the People's Republic of China) (2006). *Outline of the National Medium and Long-Term Science and Technology Development Program (2006 - 2020)*.

The Editorial Board of China Steel Yearbook (2015). *China Steel Yearbook 2015*. China: China Iron and Steel Association, pp. 26-37.

Tsai, I. T., Ali, M. Al., Waddi S. El. and Zarzour, O. A. (2013). Carbon Capture Regulation for the Steel and Aluminum Industries in the UAE: An Empirical Analysis. *Energy Procedia*, 37, pp. 7732-7740.

Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, A. and Pisilä, E. (2013). Post-Combustion Capture of CO<sub>2</sub> at an Integrated Steel Mill – Part II: Economic Feasibility. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 16, pp. 178-286.

Tsupari, E., Kärki, J., Arasto, J., Lilja, J., Kinnunen, K. and Sihvonen, M. (2015). Oxygen Blast Furnace with CO<sub>2</sub> Capture and Storage at an Integrated Steel Mill – Part II: Economic Feasibility in Comparison with Conventional Blast Furnace Highlighting Sensitivities. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 32, pp. 189-196.

UNFCCC (2015). *Adoption of the Paris Agreement*. Paris.

Van Dijk, H. A. J., Cobden, P. D. Lundqvist, M., Cormos, C.C., Watson, M.J., Manzolini, G. and Sundelin, B. (2017). Cost Effective CO<sub>2</sub> Reduction in the Iron & Steel Industry by Means of the SEWGS Technology: STEPWISE Project. *Energy Procedia*, 114, pp. 6256-6265.

Wang, Q., Luo, J., Zhong, Z. and Borgna, A. (2010). CO<sub>2</sub> Capture by Solid Adsorbents and Their Applications: Current Status and New Trends. *Energy & Environmental Science*, 4(1), pp. 42-55.

- Wen, Z., Meng, F., and Chen, M. (2014). Estimates of the Potential for Energy Conservation and CO<sub>2</sub> Emissions Mitigation Based on Asian-Pacific Integrated Model (AIM): The Case of the Iron and Steel Industry in China. *Cleaner Product*, 65, pp. 120-130.
- Wiley, D. E., Ho, M. T. and Bustamante, A. (2011). Assessment of Opportunities for CO<sub>2</sub> Capture at Iron and Steel Mills: An Australian Perspective. *Energy Procedia*, 4, pp. 2654-2661.
- World Steel Association (2015). *World Steel in Figures 2015*. Brussels: World Steel Association, pp. 8-15.
- World Steel Association (2016). *World Steel in Figures 2016*. Brussels: World Steel Association, pp. 3-17.
- Xu, C. and Cang, Q. (2010). A Brief Overview of Low CO<sub>2</sub> Emission Technologies for Iron and Steelmaking. *Journal of Iron and Steel Research, International*, 17(3), pp. 1-7.
- Xu, W., Li, Y., Zhu, T. and Cao, W. (2013). CO<sub>2</sub> Emission in Iron and Steel Making Industry and Its Reduction Prospect. *The Chinese Journal of Process Engineering*, 13(1), pp. 175-180.
- Zhang, H., Dong, L., Li, H., Fujita, T., Ohnishi, S. and Tang, Q. (2013a). Analysis of Low-carbon Industrial Symbiosis Technology for Carbon Mitigation in a Chinese Iron/Steel Industrial Park: A Case Study with Carbon Flow Analysis. *Energy Policy*, 61, pp. 1400-1411.
- Zhang, C., Sun, Z., Chen, S. and Wang, B. (2013b). Enriching Blast Furnace Gas by Removing Carbon Dioxide. *Journal of Environmental Sciences*, 25(1), pp. S196-S200.
- Zou, A., Luo, X. and Quan, C. (2013). Analysis of Factors Influencing CO<sub>2</sub> Emissions in an Integrated Steel Works based on EIO-LCA. *Management World*, 12, pp. 178-179.