

钢铁绿色低碳与 CCUS 的宝钢实践

宝钢股份中央研究院

2018 年 11 月

目录

1 外部驱动.....	1
1.1 人类命运共同体.....	1
1.2 中国转型发展.....	2
1.3 中国钢铁声望.....	3
2 内在动力.....	5
2.1 资源环境硬约束.....	5
2.2 商业驱动力.....	5
2.3 社会责任.....	6
3 宝钢实践.....	6
3.1 永续经营.....	6
3.2 绿色产品.....	9
3.2.1 产品绿色认证.....	9
3.2.2 开发绿色产品.....	9
3.2.3 客户解决方案.....	10
3.2.4 绿色服务.....	10
3.3 绿色制造.....	10
3.3.1 资源能源效率.....	10
3.3.2 环境治理.....	11
3.3.3 低碳节能.....	13
3.4 CCUS.....	16
3.4.1 国外.....	16
3.4.2 国内.....	21
3.4.3 BAO-CCU.....	22
3.5 碳汇.....	28
3.5.1 钢厂余热与生物质能.....	28
3.5.2 生物质碳与碳汇.....	29
3.5.3 宝钢方案.....	30
4 总结.....	31

缩略词

AHSS	Advanced High Strength Steel, 先进高强度钢
BAT	Best Available Technology, 最佳可适技术
BC	Bio-char, 生物炭
CAE	Computer Aided Engineering, 计算机辅助工程
CCS	Carbon Capture and Storage, 碳捕集与封存
CCU	Carbon Capture and Utilization, 碳捕集与利用
CCUS	Carbon Capture, Utilization and Storage, 碳捕获、利用与封存
COP	Conferences of the Parties, 缔约方会议
CO ₂ -ECBM	CO ₂ - Enhanced Coal Bed Methane Recovery, 二氧化碳提高煤层气采收率
COURSE50	Ultimate Reduction in Steelmaking process by innovative technology for cool Earth 50, 环境和谐型炼铁工艺技术开发
EHS	Environment, Health and Safety, 环境健康安全
EMS	Environmental Monitoring System, 环境监测系统
EOM	Environmental Online Monitoring, 环境在线监测
EOR	Enhanced Oil Recovery, 提高石油采收率
EPD	Environmental Product Declaration, 环境产品声明
EU	European Union, 欧洲联盟
EVI	Early Vendor Involvement, 先期介入
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, 政府间气候变化专门委员会
INC/FCCC	the Intergovernmental Negotiating Committee for a Framework Convention on Climate Change, 气候变化框架公约政府间谈判委员会
IEA	International Energy Agency, 国际能源署
LCA	Life Cycle Assessment, 生命周期评估
LDG	Linz Donawitz Gas, 转炉煤气
MEA	Monoethanolamine, 单乙醇胺
NEDO	the New Energy and Industrial Technology Development Organization, 新能源产业技术综合开发机构
NGOS	Non-Governmental Organizations, 非政府组织
ORC	Organic Rankine Cycle, 有机朗肯循环
PSA	Pressure Swing Adsorption, 变压吸附
REACH	the Registration, Evaluation, Authorization and Restriction of Chemicals 《化学品的注册、评估、授权和限制（欧盟法规）》
SCR	Selective Catalytic Reduction, 选择性催化还原
TSA	Temperature-Variable Adsorption, 变温吸附
ULCOS	the Ultra-low CO ₂ Steelmaking, 超低二氧化碳炼钢
UN	United Nations, 联合国
UNEP	United Nations Environment Programme, 联合国环境规划署
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change, 联合国气候变化框架公约
VOCs	Volatile Organic Compounds, 挥发性有机物
VPASA	Vacuum Pressure Swing Adsorption, 真空变压吸附
WMO	World Meteorological Organization, 世界气象组织

钢铁绿色低碳与 CCUS 的宝钢实践

World Steel 数据表明，2017 年全球钢产量为 16.89 亿吨，二氧化碳排放量大于 32 亿吨，2017 年中国钢产量为 8.317 亿吨，约占全球钢产量 49.2%，中国对钢铁领域控煤、控碳及排放总量控制愈加严格，全球二十国集团钢铁产能过剩论坛上，二十国集团部长们就削减过剩产能达成共识，钢铁业正处于有趣但并不轻松的发展关键阶段，而钢铁低碳运行、绿色发展已是大势所趋。宝山钢铁股份有限公司（以下简称：宝钢或宝钢股份），不仅为社会提供绿色可循环的钢铁材料，而且严格履行社会责任，40 年高起点应用低碳高效技术，坚持自主开发绿色低碳技术，近几年开展的 CCUS 技术研究被 World Steel 冠以 Bao-CCU，堪称钢铁行业绿色低碳标杆企业，本文重点总结宝钢绿色低碳与 CCUS 实践案例。

1 外部驱动

1.1 人类命运共同体

二氧化碳与全球变暖的话题早在 1896 年就有瑞典科学家提出，到了 20 世纪 70 年代，这问题引起更多关注。1988 年，联合国环境规划署（UNEP）和世界气象组织（WMO）成立了政府间气候变化专门委员会（IPCC），并于 1990 年发布第一份评估报告。经过数百名科学家和专家评议，该报告确定了气候变化的科学依据。1990 年，第二次世界气候大会呼吁建立一个气候变化框架条约，年底，联合国常委会批准气候变化公约谈判，气候变化框架公约政府间谈判委员会（INC/FCCC）在 1991 年 2 月至 1992 年 5 月期间进行了 5 次会议，1992 年 6 月在巴西里约热内卢举行联合国环境与发展大会并签署《联合国气候变化框架公约》（UNFCCC）。自 1995 年起，该公约缔约方每年召开 COP（Conferences of the Parties）以评估应对气候变化进展，1997 年发布了《Kyoto Protocol》，2009 年 COP15 缔约方会议诞生一份新的《哥本哈根议定书》以取代 2012 年到期的《Kyoto Protocol》。2015 年 12 月 12 日，堪称人类合作史上一个开创性时刻，联合国关于气候变化的《巴黎协定》以史无前例的速度通过并在很短时间里达成实施一系列减排措施的共识。该协定目标是将全球平均温升控制在低于工业化前水平的 2℃ 以内并对整个人类社会的行为提出了新的要求。中国国家主席习近平在开幕式上强调巴黎协议“不是终点，而是新的起点”，是对未来全球治理模式的探索和建设“人类命运共同体”的推动。

伦敦政治经济学院帕特经济政府学教授 Nicholas Stern 勋爵认为，在联合国气候公约下，依然存在两个重要问题：首先，尚未看到那个缔约国为实现这个雄心勃勃目标而采取必要的加速措施，这可能是今后两届、三届 COP 及每个国家在制定措施时所面临的核心问题；第二，还没有看到各国为实现这些目标而采用必要、全面而完整的清洁技术计划。实际上，2016 年化石燃料达到 836 亿桶油当量，相比 10 年前的 733 亿桶当量，除了 2009 年全球经济衰退带来的影响外，没有一年是低于上一年的，而且自 1960 年以来，CO₂ 排放也是每年在增加，且最近两年又创新高。如图 1 所示，据劳伦斯伯克利实验室研究结论（Key China Energy Statistics 2014），若亚洲、拉丁美洲、非洲人均 CO₂ 排放达到世界人均水平，那基于上述计算、分析、设计的政策、措施将均要重新考虑，这是

一个发达国家、发展中国家、欠发达国家之间的合作、协商与共同发展大话题。

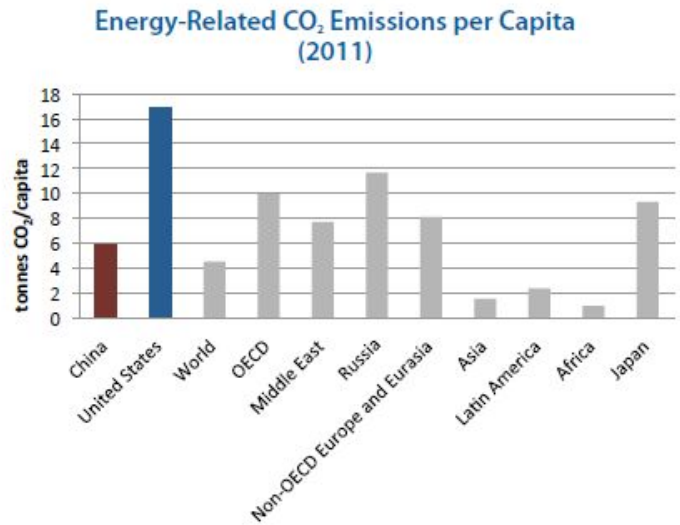


图 1 人均 CO₂ 排放

2018 年 10 月 8 日，在韩国仁川，IPCC 举行第 48 次全体会议并发布了一份气候报告，报告认为，如果气候变暖以目前的速度持续下去，预计全球气温在 2030 年至 2052 年间就会比工业化之前水平升高 1.5℃。由于现今地表均温较工业革命前水平已经升高 1℃，按照第二项控温目标，人类活动所致温度上升不能超过 0.5℃。这份报告指出，如果实现“1.5℃”目标，经常遭遇极端高温天气的人口将减少大约 4.2 亿，遭遇异常高温天气人口减少 6400 万，但要实现“1.5℃”目标，亟待全球社会大幅减少温室气体排放，并且在能源体系、耕地使用、城市和工业设计、交通、建筑等领域迅速作出深刻变革。报告也指出，这些技术的有效性尚未得到大规模验证，有些可能会给可持续发展带来大风险。这些技术变数，更加增加了跨政府间协商、跨区域间合作、跨行业间协调，政策、商业、技术协同的难度。

人类只有一个地球，各国共处一个世界，人类社会是一个相互依存的共同体，若环境发生不可逆的变化，所有将为时已晚，而且不可逆的事，越早行动，对环境的危害越小，人类付出的代价也越少。但现实是认知与行动往往存在脱节，形象诉求与利益目标不一定在同一方向，技术与商业也不一定趋于同步，以上种种制约了低碳技术的普及应用。从行业低碳先锋案例出发，发掘政策、商业、技术所起的作用，或许能得出政策引导与机制设计在发挥企业家精神、市场商业利益驱动、技术创新引领的借鉴之处。

1.2 中国转型发展

过去几十年，中国逐渐成为制造大国，为世界输出制造类商品，极大提高了世界各国人民物质生活水平，但也成为世界能源消费与碳排放大国。在全球低碳可持续发展的浪潮下，中国也步入碳减排“责任共担”行列。2014 年，在秘鲁首都利马第 20 轮缔约方会议上，中国表态：2016 年~2020 年，每年 CO₂ 排放在 100 亿吨以下。2015 年巴黎会议上，中国政府承诺：1) 2030 年，单位 GDP 的二氧化碳排放量比 2005 年下降 60%~65%；2) 2030 年，非化石能源比重提

升到 20%左右；3）2030 年左右化石能源消费的 CO₂ 排放达到峰值；4）2030 年森林蓄积量比 2005 年增加 45 亿立方米。2016 年 9 月 3 日，习近平主席同美国总统奥巴马、联合国秘书长潘基文在杭州共同出席气候变化《巴黎协定》批准文书交存仪式，中国倡议二十国集团（G20）发表首份气候变化问题主席声明，中国向联合国交存批准文书是中国政府作出的庄严承诺。此外，中国《“十三五”控制温室气体排放工作方案》提出，到 2020 年，单位国内生产总值二氧化碳排放要比 2015 年下降 18%，工业领域二氧化碳排放总量要趋于稳定，钢铁、建材等重点行业二氧化碳排放总量得到有效控制。

尽管国际社会依然在争议发达国家、发展中国家碳减排标准，但中国政府已积极开展行动。国家陆续出台了《中国国家自主贡献》、《国家应对气候变化规划》、《能源生产和消费革命战略(2016-2030)》、《工业领域应对气候变化行动方案》、《绿色制造工程实施指南》、《关于煤炭行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》、《关于钢铁行业化解过剩产能实现脱困发展的意见》、《“十三五”控制温室气体排放工作方案》、《“十三五”节能减排综合工作方案》、《全国碳排放权交易市场建设方案（发电行业）》、《钢铁工业调整升级规划》等等。中国也高度重视 CCS，中国第一个大规模 CCS 设施，陕西延长石油项目 2015 年通过国际认证，广东、四川、河北、天津、福建、吉林和甘肃等省政府已将 CCS 示范项目作为工业温室气体减排关键技术纳入其省级“十三五规划”中。

工业企业作为我国耗能大户，占全国碳排放 70%以上，钢铁、建材、石化、化工、有色、电力六大高耗能行业其能源消费又占整个工业能耗比重的 70%以上，在全球碳减排大形势和压力下，低碳时代的到来对这些高碳行业传统经济模式带来前所未有的冲击，许多企业已到了难以为继的临界极限。当然，由于对节能减排认识高度不一样，也导致不少工业制造企业低碳环保现状良莠不分。严格履行社会责任的优秀企业已从“人类命运共同体”高度开展绿色低碳转型并付诸切实可行的积极行动。

1.3 中国钢铁声望

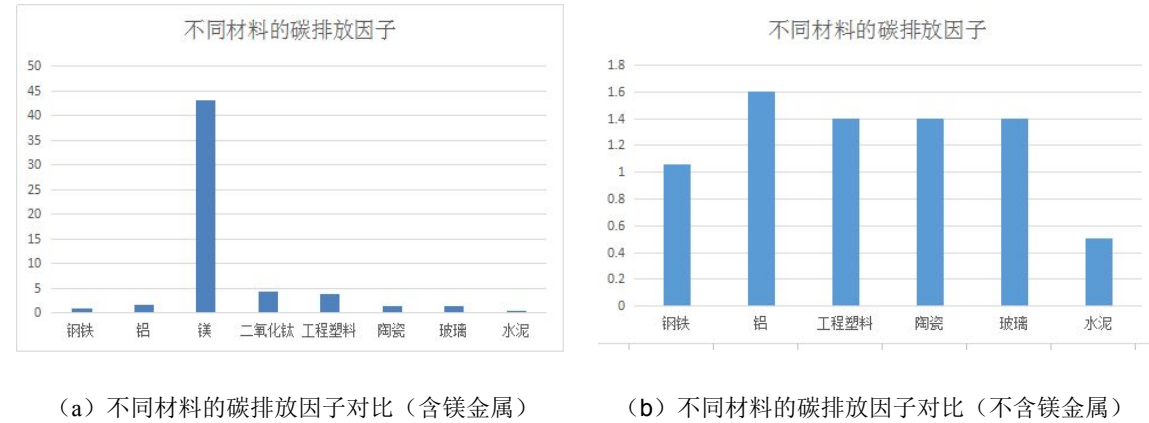


图 2 结构材料中钢铁材料的低排放特性

全生命周期（LCA）评价指出，作为结构材料，钢铁比铝、镁、钛等金属，工程塑料、水泥等非材料，其温室气体排放均少得多（如图 2）。尽管从铁器时

代至今，钢铁作为经济发展、文明构建、社会运行的核心支撑从未被撼动，但当今社会人们看到的往往是钢铁行业高能耗、高排放的一面，而无视钢铁绿色低碳的本身材料属性，实际上，中国转型发展，相比水泥、碳纤等不可回收材料，更需要钢铁这一可回收、高比强度绿色材料。比较不同材料碳排放特性，引导社会选择低碳材料，也是低碳发展途径之一，World Steel 总干事 Edwin Basson 说：“钢铁不仅是未来全球经济的支柱，还是未来发展绿色经济的核心”。

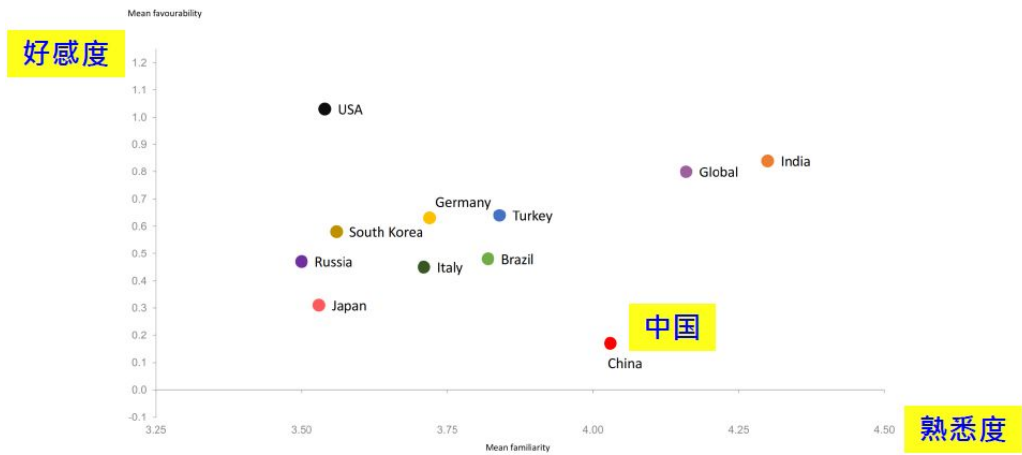


图 3 十国钢铁声望调查（数据来源：World Steel 统计数据 2018）

钢铁工业为中国国民经济发展、社会现代文明作出巨大贡献的同时，又被指责为污染之源、耗能之首，政府、公众、媒体对钢铁有诸多误解，钢铁企业在生存发展、招聘人才、资本市场等诸多领域受限，甚至被当做雾霾之祸首而遭受限产、关停。World Steel 针对钢铁及钢铁业声望，在 2011 年、2014 年、2018 年分别开展了三次调查，调查涵盖 10 个国家，对象分为：钢铁利益相关者与国际组织，前者包括商业、潜在客户、政府官员和商业媒体，后者主要是 UN、EU 以及一些 NGOS 等。被调查对象联想到钢铁的特性有正面、负面，而负面集中在产生污染、气候变化影响、资源耗竭。由图 3 可见，各国对钢铁业的好感度与熟悉程度对比，美国是不熟悉但好感，而中国则是熟悉但好感程度最低。

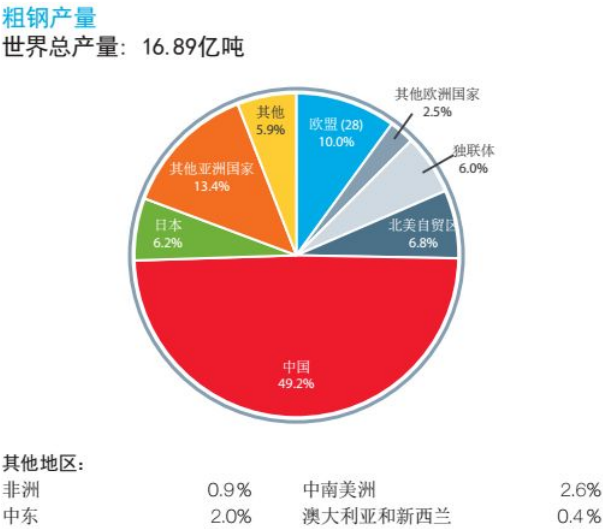


图 4 钢铁产量 2017 年分地区构成（数据来源：World Steel 统计数据 2018）

如图 4 所示，2017 年全球钢产量为 16.89 亿吨，二氧化碳排放大于 32 亿吨，中国是世界最大的钢铁生产大国，占全球近 49.2% 的粗钢产量。国际能源署估计，全球钢铁行业生产过程中 CO₂ 排放约占全球温室气体排放总量的 4%-5%，中国钢铁行业碳排放量约为中国碳排放总量的 14%。尽管钢铁是绿色经济的核心，如此大体量的碳排放，但无论世界钢铁，还是中国钢铁，低碳绿色发展是必由之路。

2 内在动力

2.1 资源环境硬约束

钢铁工业为我国经济社会发展做出了巨大的贡献，也伴随着大量污染物的产生和排放。中国“十三五”规划，资源、环境约束性指标进一步加强，钢铁行业面临更严格能源环保标准。此外，伴随全球钢铁产业产能过剩的发展形势，中国钢铁产业发展的时代主题正在发生由“增量、扩能”到“减量、调整”的变化，中国钢铁产业已步入减量整合阶段、创新转型阶段，中国钢铁产业的减量发展将经历一个较长时期的优胜劣汰、多元并举、创新发展的过程。World Steel 总干事 Basson 先生认为，“一个可持续发展的钢铁工业需要保持一个适当的产能，这样才能满足整个国家的用钢需求，用环保淘汰不符合标准的钢铁产能以及化解产能过剩，我们支持中国的做法。”。真正有战略眼光、有生态责任担当的企业实施绿色发展，是反思历史、正视现实和面向未来，既理性又明智。

2.2 商业驱动力

传统的钢铁业作为工业化时代的支柱性产业，也是工业文明的重要推进者，如今却备受资源、环境问题困扰同时，还要面临全球制造业重大调整、中国钢铁业步入“冬常态”的严峻市场竞争。中国金属学会理事长、中国工程院院士干勇认为，目前，钢铁企业的发展受到“高污染、高能耗”瓶颈的严重制约，而绿色制造作为一种现代制造模式，是解决这一问题的有效模式，钢铁企业绿色制造体系要求企业按生态学规律，把环境保护、清洁生产、节能降耗、资源综合利用、开发新产品等融为一体。

随着环保政策快速收紧，国内钢铁企业不仅要投入大笔资金用于环保改造，而投入后钢铁生产的环保设施运行，其成本又是一笔不小的开支；另一方面，钢铁行业大致 1/3 的制造成本是能源。从企业经营的内在动力看，低成本地实现绿色低碳钢铁生产，这方面的需求确实存在；政府如何更好地引导这一方面的政策供给、技术供给，为企业创造良好绿色低碳转型发展和绿色低碳技术创新经营环境。

2.3 社会责任

企业的社会责任，尤其是生态责任是钢铁企业支撑绿色发展的重要的品牌资本和机会资本。一个社会责任缺失的钢铁企业，往往为利润的最大化而不惜将环境成本外部化，如：偷排废水废气、排放不达标、不投或不运行环保设备等，最终将被纳入无良企业黑名单，其企业不仅会得到环保法规的严惩，而且其发展还会受到社会各界限制与舆论谴责，企业品牌形象将因此严重受损，进而导致企业获利下降、发展机会锐减。反之，一个自觉担当责任的钢铁企业，其前期良好的环保投入与绿色、低碳、循环发展，将大大提升企业绿色形象，并在绿色发展中

会转化为企业绿色品牌，从而在行业与社会中获取更多的发展先机，赢得更多的市场和发展机会。宝武集团董事长陈德荣指出，过去两百多年钢铁工艺技术革命的核心是解决“效率”问题，未来钢铁工艺技术革命的核心是要解决“清洁制造”问题。“城市钢厂”在转型升级的过程中，必须立足于资源环境现状与规划发展要求，着力持续提升绿色制造水平，不断改善区域环境质量；积极承担社会责任，投入公益慈善事业和社区建设，将产城融合、生态和谐作为企业发展可持续发展的核心目标。

3 宝钢实践

根据 2017 年粗钢产量，World Steel 发布的全球前 50 大钢铁企业名单，安塞乐米塔尔继续位列全球第一位，宝武集团连续两年排名第二。宝山钢铁股份有限公司作为宝武集团钢铁主业旗舰公司拥有上海宝山、南京梅山、湛江东山、武汉青山等主要制造基地，在全球上市钢铁企业中粗钢产量排名第二、汽车板产量排名第三、取向电工钢产量排名第一。2017 年宝钢股份全年产铁 4521 万吨，产钢 4705 万吨，商品锭坯材产量 4617.0 万吨；全年耗能总量 2803 万吨标煤，吨钢综合能耗 596 千克标煤，全年营收 2895.0 亿元。宝钢股份连续 14 年进入美国《财富》杂志评选的世界 500 强。

3.1 永续经营

十年前，面对我国钢铁行业日益突出的环境问题以及产品附加值低，宝钢提出“环境经营战略”，宝钢确定的环境经营有三大任务：推进节能减排，实现绿色制造；开展生态设计，开发环境友好产品；整合环境技术，发展绿色环境产业。其中，绿色制造和开发环境友好产品这两大任务，使得企业实现清洁生产，节省能源，降低消耗。而绿色产业任务，则使得宝钢把多年集聚的与节能环保有关的技术和能力发挥出来，开辟出新的市场空间。时任宝钢集团董事长徐乐江在 2011 年由中国环保联合会主办的环境与发展论坛上撰文，提出环境经营是指把环境保护融入企业经营管理的全过程，使环境保护和企业经营融为一体的企业经营活动。基于此，宝钢确立环境经营为推进二次创业的长期战略，其经营战略的基本构架共有四个重要方面：一是在纵向发展阶段上确立钢铁主业三个逐阶提升的核心层面作为推进主线；二是在横向系统覆盖上构建环境经营的价值链体系和绿色产业链，形成核心能力；三是重点推进技术创新和循环经济，形成环境经营的关键支撑；四是建立并完善环境经营的决策与管控体系，构筑软实力支撑平台。

在集团公司环境经营统一战略下，宝钢股份坚持可持续发展，其愿景是：成为钢铁技术的领先者，成为环境友好的最佳实践者，成为员工与企业共同发展的公司典范。成为钢铁技术领先者则是：确立钢铁技术行业领先地位，提升技术创新的价值贡献。成为环境友好最佳实践者则是：1) 严格遵守国家节能环保法律、法规和标准，履行国际环境公约，符合环保法规要求是我们的最低标准；2) 实行最严格的内部控制标准，改进生产工艺，优化能源结构，减少能源消耗，降低能源成本，持续减少企业和产品使用过程的能源消耗与环境影响；3) 保证制造过程中不故意添加法律法规禁止的对环境和健康有害的物质，同时降低产品在使用寿命中对环境产生的有害影响；4) 推进工业废弃物的减量化、再使用和资源化，并助力城市废物的循环利用；5) 优先与环保业绩良好的供应商、分包方合作，提升供应商在可持续发展方面的意识和绩效，同时积极为客户提供绿色解决

方案，致力于打造绿色产业链；6）促进合作伙伴在节能环保管理和业绩方面的持续改进，发布基于生命周期评价的产品环境声明，公示核心产品的环境绩效，方便客户和其他相关方比较不同产品全生命周期的影响；7）开发和推广高能源效率和高资源效率的产品和系统，推进节能环保技术的研发和推广，与用户分享先进的环境设计理念和技术，向社会提供环境绩效优良的产品和服务；8）关注气候变化，积极参与国内外节能环保交流和合作，改善地球生态环境，积极开展与政府、企业及国际间合作，推广应用国际间的研究成果，与各国先进节能及环境改善技术同步发展；9）提高员工环境保护和生态和谐意识，促进员工在工作、生活、社会参与等各方面的环境友好行为；10）共建美好生活的城市钢厂。成为员工与企业共同发展公司典范则是：1）企业与员工休戚与共，共同承担员工成长与发展的责任；员工与企业同舟共济，共同承担企业应对挑战与持续发展的责任；2）企业提供舞台与环境，帮助员工实现人生价值；员工为企业贡献力量，帮助企业实现价值最大化；3）企业与所有创造价值的员工共同分享发展成果，满足员工的物质文化需求；员工与企业共同分享个人的贡献与成果，满足企业提升经营绩效的需求；4）企业提供资源和平台，促进员工能力与素质的提升；员工最大限度的激发潜能，促进企业战略目标实现能力的提升。

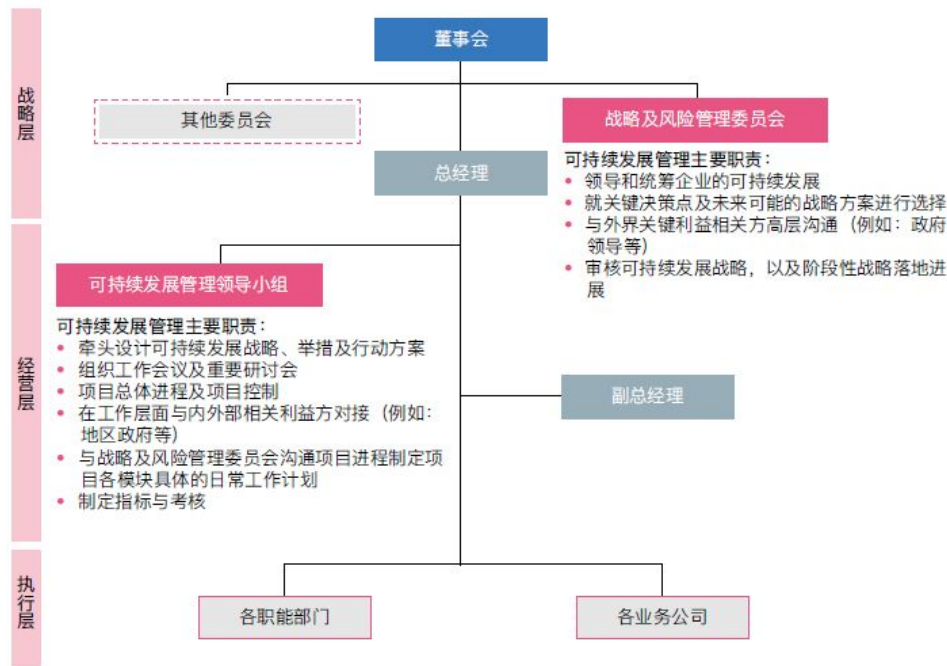


图 5 宝钢股份的可持续发展管理组织体系

宝钢股份的可持续发展管理组织体系如图 5 所示。宝钢股份可持续发展体系保障如表 1 所示。宝钢股份通过了包含质量管理、能源管理、环境管理、职业健康安全管理、计量管理和实验室管理等在内的外部体系认证，在日常生产经营中以体系相关规定为准绳，接轨国际，优化管理，提升效益。宝钢股份积极参与上海市政府的碳排放交易试点工作，出台了《宝钢股份碳资产管理办》，启动了碳成本核算数据系统项目，加强碳排放的数据管理。与此同时，公司积极配合做好全国碳市场启动的各项数据准备等基础工作。2017 年，公司围绕“城市钢厂”

建设能力提升，面向四基地继续推出城市钢厂系列专题培训。

表 1 宝钢股份可持续发展体系保障

体系类别	体系名称
质量管理体系	ISO9001
	QS9000/ISO TS16949/IATF16949*
环境管理体系	ISO14001
能源管理体系	ISO50001（GB/T23331）*
职业健康安全管理体系	OHSAS18001
计量管理体系	ISO10012-1
实验室管理标准	ISO/IEC17025

备注：

1) 东山基地于 2018 年通过能源管理体系；

2) 青山基地质量管理体系无 QS9000，东山基地无 QS9000 以及 ISO TS16949，梅山基地无 QS9000 以及 ISO IATF16949。

宝钢股份是中国冶金行业最早通过 ISO14001 环境贯标认证，2010 年首批通过国家能源管理体系标准 GB/T 23331-2009 认证，首批获得“国家环境友好企业”、中国钢铁行业“清洁生产环境友好企业”、中国企业家协会“中国绿色公司”标杆等称号。2016 年以来，宝钢股份连续两届当选联合国全球契约组织“实现可持续发展目标（SDGs）”中国先锋企业。2017 年，宝钢股份可持续发展实践获评中钢协年度管理创新成果一等奖。

3.2 绿色产品

宝钢股份关注用户的绿色需求、关注行业发展动向，开发和推广高能源效率和高资源效率的产品和系统，与用户分享先进的环境设计理念和技术，向社会提供环境绩效优良的产品和服务；公司发布基于生命周期评价的产品环境声明，公示核心产品的环境绩效，为同行业、同产品及不同行业、不同产品环境绩效比较提供客观数据。

3.2.1 产品绿色认证

宝钢股份全系列八大类产品均获得 Intertek 绿叶标签认证，Intertek 是世界上规模最大的消费品测试、检验和认证公司之一，对于宝钢股份的绿色产品认证基于环境保护，有毒有害物质控制，能源效率和资源利用效率情况以及产品寿命、包装和回收情况等各方面的评估。同时，宝钢股份各类产品也持续得到汽车行业、家电行业、起重机行业、特殊钢行业以及城市轨道交通行业的产品认证。

3.2.2 开发绿色产品

宝钢股份应用钢铁产品全生命周期的管理方法，积极开发以电工钢、高强钢、涂镀产品及高耐候产品等高效钢材为代表的“环境友好产品”，减少下游用户的钢材使用量，延长钢材使用寿命，提高社会资源的利用效率，产品广泛应用于太阳能、核电、风力发电等绿色能源领域，以及汽车、食品包装、铁道车厢等领域。

宝钢股份典型绿色产品包括：1) 电工钢。主要分为高效无取向电工钢以及高磁感取向硅钢。采用高效电工钢取代传统电工钢制成各种电机铁心，可明显降低空载电流、提高电机效率、改善综合运行指标。取向硅钢是制造低能耗变压器

的理想铁芯材料。目前，宝钢股份生产的高牌号取向硅钢已经供应三峡大坝使用，并广泛应用于国家力推的特高压输电项目以及各类高效电机的生产。2) 高强度钢板 (AHSS)。高强度钢板具有强度高、寿命长的特点，属于可持续发展的绿色产品。汽车制造采用高强度钢，可以节约材料，还能提高汽车的碰撞被动安全性能，是汽车“减重节能”的首选材料。3) 涂镀产品。宝钢涂镀产品广泛应用于家电用钢、食品包装、建筑用钢等行业。如宝钢彩涂板用于制造通信机柜、机顶盒外壳通信机柜，产品美观并具有良好的耐蚀性。4) 高耐候产品。宝钢高耐候产品广泛应用于制造集装箱、铁道车厢、市政建设等领域。这类产品在具备同等的耐候性能条件下，提高钢材强度，实现箱体高强减排；宝钢金属波纹管目前已经应用于综合管廊改造、海绵城市建设等市政工程领域。

【宝钢股份绿色产品低碳绩效案例】1) 宝钢高强度钢用于汽车板制造，在不降低车体强度的前提下，实现汽车质量的减重，以某工程车辆为例（车身重 9000kg），采用 AHSS 使车身重量减少 2700kg，节省油耗约 8.1-16.2 升/百公里，降低成本约 7000 元/辆，减少 CO₂ 排放约 18.63 吨/辆。2) 宝钢镀锡板产品用于钢制食品饮料罐制造，产品持续减薄，实现碳减排绩效的优化，实现了单个钢罐的碳排放总量减少 15%。3) 宝钢高效电工钢代替普通牌号电工钢，基本不改变产品制造过程中碳排放量，但可以大幅度削减产品使用过程中的碳排放，在变压器制造和使用过程的碳排放总量减少 15%。4) 宝钢 S450EW 耐候钢用于制造火车车厢，可使整车寿命延长一半以上，每节车厢可节约钢铁 3.75 吨，相当于减排 7 吨 CO₂。

3.2.3 客户解决方案

公司充分发挥绿色钢铁产品在研发、成型、分析及用户使用技术研究方面的技术优势，以技术服务、产品拓展、先期介入 (EVI)、整体解决方案、双赢方案等为抓手，满足用户特殊需求，感动用户。

【加强 EVI 合作的案例】2017 年与福建省汽车工业集团云度新能源汽车股份有限公司开展 B101 车型第一层次 EVI 技术合作，根据 B101 车型白车身数据、CAE 碰撞结果、白车身重量，在保证碰撞性能前提下，提出 7 项结构优化建议以及轻量化优化方案 53 项，最终协同用户满足安全碰撞要求并实现白车身减重 23kg。

3.2.4 绿色服务

公司遵循可持续的客户服务理念，积极跟进国内外法规变化和用户绿色需求发展，针对各类产品组织开展各项认证评估，并及时跟进欧盟 REACH 指令第十四批和十五批高度关注物质公布，组织内部评估，更新发布了宝钢产品 REACH 合规性声明；同时，公司把握用户个性化需求动态，及时组织开展第三方认证工作并作出相应承诺，涉及汽车、家电及电子、金属包装及容器、能源交通运输、输配电和工程及建筑六大行业。近年来，公司先后组织开展产品第三方检测并公布了 138 份第三方检测报告，产品包括热轧、酸洗、冷轧、热镀锌、电镀锌、镀铝锌、镀锡、电工钢等八大类产品，报告结果显示：所有产品符合中国 RoHS、欧盟 RoHS 指令、REACH 法规等法规要求。在向用户公布检测结果的基础上，公司启动绿色标志在产品质保书和标签的列印工作，不断完善绿色产品体系建设，防范环保相关法规的经营风险。

3.3 绿色制造

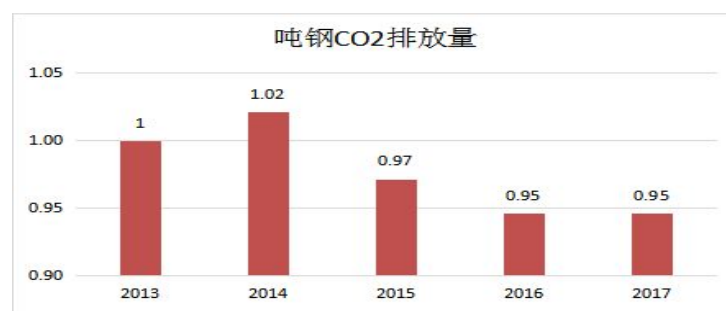
绿色制造是宝钢 40 年发展始终坚持的目标，宝钢实行最严格的内部控制标准，改进生产工艺，优化能源结构，减少能源消耗，降低能源成本，持续减少企业 and 产品使用过程的能源消耗与环境影响；积极寻求整个产业链的绿色发展和低碳解决方案；开发和推广高能源效率和高资源效率的产品和系统。通过寻求持续改善的低碳工艺路径，不断降低生产过程中的资源、能源消耗；基于全生命周期的环境管理理念，从源头预防、过程管控到末端治理，采取先进的生产工艺和污染控制措施，并加强过程管理，以最低的消耗和最小的排放完成钢铁产品的生产过程。

3.3.1 资源能源效率

宝钢股份的能源、资源综合利用水平在行业内一直处于先进水平，近年主要能源消耗情况和吨钢 CO₂ 排放量如表 2 和图 6 所示。吨钢综合能耗、吨钢耗新水量以及吨钢 CO₂ 排放量呈逐年下降趋势，而余能回收总量则逐年呈大幅度上升趋势。宝钢资源综合利用率大于 99%，危险废物均委托具有危废处置资质的单位进行处置，并完成环保局备案工作，做到所有危险废弃物安全处置的可追溯，危险废物合规处置率 100%。

表 2 主要能源指标

指标名称	2014 年	2015 年	2016 年	2017
吨钢综合能耗	1.00	0.97	0.97	0.96
吨钢耗新水	1.00	0.95	0.93	0.89
余能回收总量	1.00	1.04	1.11	1.12



注：数据为比例值

图 6 吨钢 CO₂ 排放逐年下降

3.3.2 环境治理

表 3 给出了宝钢近年来各项污染物放入吨钢排放水平。公司通过各项工程、管理和技术手段，不断加强环保过程管理，确保污染物排放全面合规、受控，主要环保指标实绩持续改善。

表 3 各项污染物吨钢排放水平指标一览表

项目	2013 年	2014 年	2015 年	2016 年	2017 年
SO ₂	1.00	0.88	0.70	0.70	0.70
烟粉尘	1.00	0.96	0.81	0.70	0.68
NO _x	1.00	0.78	0.69	0.69	0.51
废水	1.00	1.20	0.89	1.27	1.13
COD	1.00	1.00	0.59	0.81	0.63
油	1.00	1.00	0.60	0.70	0.50

注：数据与上年同口径，以 2013 年作为基准，表格中数据为比例值

重点治理举措包括：

1) 全面响应国家和地方清洁大气行动。宝山基地原料堆场是华东地区最大散装原料场，占地面积近 190 万平方米，年作业总量近 1.4 亿吨，相关皮带机运输系统总长超过 125 公里。作为公司减少无组织排放的主动治理项目，料场的全封闭工程原计划 2014-2020 六年完成。为响应长三角大气限期治理计划要求，公司克服边生产、边建设的各项困难，将工期压缩到 4 年。宝山基地自备燃煤发电机组超净排放改造列入上海市清洁大气行动计划，目前已完成工程设计和设备采购，2017 年完成 1#、2#机改造任务，确保全时段、全过程达到粉尘 5mg/Nm³、二氧化硫 35mg/Nm³、氮氧化物 50mg/Nm³ 的“5-35-50”火电机组超净排放标准。

2) 行业示范技术的工程化应用。宝钢股份东山基地（湛江钢铁）在建设坚持环保最高起点、最高标准，并率先将大量行业前沿探索和示范性技术自主工程集成应用，以大型焦炉烟气综合治理、烧结一体化烟气治理、原料系统全封闭、冶金尘泥转底炉、焦化废水湿地处理、海水淡化及雨水收集利用等一大批环保技术。梅山基地烧结机采用自主集成“臭氧氧化+循环流化床”脱硝技术，成为国内首创的烧结机头全烟气脱硫脱硝工程，年降低 NO_x 排放 816 吨。青山基地投资环保项目 40 项，公司落锤间粉尘治理等 12 项工程建成投运，主要污染物总量同比下降 4.79%。

3) 加强体系建设，持续提升环境风险管理水平。1998 年，公司成为中国钢铁行业首家通过 ISO14001 环境保护体系认证的钢铁企业。2017 年，公司在 ISO14001 新版环境管理体系的框架下，按环境管理体系标准要求，考虑活动、产品和服务中可以控制和考虑生命周期观点可施加影响的环境因素和相关的因素，完成新一轮环境因素的补充识别、评价、判定及落实管理方案，将生命周期理念融入产品设计、节材、采购、销售业务等，修订相关专业管理文件。

4) 切实提高工厂过程管控水平，确保环保设施稳定高效。公司一方面不断优化生产工艺，采取高效的污染控制手段；另一方面，提升设备运维水平，加强生产过程管控，确保环保设施稳定、高效运转。公司制定了相应的环保设备管理文件，根据各类环保设施的特点、重要性，对烧结脱硫、脱硝设备，电厂脱硫脱硝设备等各类重点环保设施，依靠各个专业团队对其进行运行、维护和管理，不断优化设备运行状态，支撑公司污染物排放达标、总量减排。

5) 推进冶金工厂固体废物和副产资源的“零废弃”。公司固废综合利用率近年来基本维持在 99%以上, 其中返回生产利用的固废在 25%以上, 其中高炉水渣全部得到综合利用, 超过 90%作为矿渣微粉得到深度利用, 钢渣在提取完金属返生产后, 其余全部应用于水泥、建材、船舶等, 含铁尘泥最大化进行返高炉利用, 粉煤灰、石膏等全部进入建材行业综合利用。为推进城市钢厂建设, 宝钢发挥钢铁企业固废消纳潜力, 为城市处置危险固体废弃物, 2016 年处置外部社会油漆桶达到 1.2 万吨, 2017 年完成 9920 吨。

6) 全面提升工业污染源监测和区域生态环境监测水平。推进烟气主动在线监测系统升级改造, 新增烧结、焦炉脱硫脱硝设施 SO₂、NO_x 监测, 新增固体废物焚烧设施颗粒物、SO₂、NO_x 及氯化氢监测, 建立全方位的 VOCs 和噪声监测网络。加大污染源自行监测和环境信息公开力度, 对污染源废水实施全因子监测, 对污染源废气在常规污染物监测的基础上, 公司开展二噁英、汞、氟化物及黑度监测; 稳步推进公司环保在线管理平台建设, 立项建立能源、环保一体化的集控中心, 实时 EOP (环境在线监测) 环境监测、监视系统与 EMS (能源管理系统) 系统的互联互通, 实现 7*24 小时工业级安全稳定要求的综合监控系统, 由环境末端在线监测转型为过程监控。

3.3.3 低碳节能

公司坚持全流程技术节能、能源结构优化、煤气化工产品化的持续改善路径, 密切追踪钢铁行业低碳工艺的前沿技术, 采用一大批强化传热、低品位余能回收、流体系统优化、工业炉窑节能等先进技术, 新能源、低碳燃料应用稳步发展。

3.3.3.1 能源管理体系开发

国内冶金行业能源利用效率平均水平与国际先进水平还有一定差距, 除了节能技术普及应用不够的原因外, 内部能源管理水平低也是重要原因之一。宝钢能源管理体系是以能源计量、统计管理为基础, 以能源专业审核为手段, 以“三流一态”(能源流、制造流、价值流、设备状态) 为核心, 以提高能源使用效率、降低能源成本为方向, 根据热力学原理和系统节能理论, 运用能源平衡管理和 PDCA 持续改进的体系管理理念, 辨识“三流一态”中的能效因子以及用能岗位的能耗源, 对节能目标进行动态管理与分析评价, 分层挖掘能源效率提升的潜力并进行分级管理控制, 提升能源使用效率降低能源成本。宝钢能源管理体系用体系管理的方法实现对能源进行系统管理的改进和创新, 实现了能源管理从离线管理到在线管理的转变, 从能源指标管理到能源价值管理的转变, 从结果管理到源头和过程管理的转变。宝钢能源管理体系的研发与实践是对冶金行业能源管理方式方法的探索与创新, 在为企业带来经济效益的同时实现了节能减排, 也为钢铁企业甚至其他行业能源管理水平的改进提供成功案例。

【宝钢能源管理系统实施案例】公司通过推进能源流、价值流、信息流和设备状态的“三流一态”能源价值管理体系, 着眼重点能效因子和关键能耗源, 确保“节电、节气、节水”取得持续效果, 宝钢能源管理体系的研发和运行在应对 2008 年国际金融风暴影响、降低能源成本方面取得了显著的效果和经济效益, 经核算, 2009 年实施能源管理体系实现经济效益 25319.4 万元; 经认证机构认证, 2010 年宝钢同比再增节能量 11.6 万吨标煤。2017 年, 公司余热发电

累计多发 0.9 亿度；公司配合城市绿色电力调度，引导错峰用电，通过优化供电系统运行，提高功率因素（控制在 0.90 以上），获得电费力率调整奖励 1257 万元。通过空分系统运行优化，氧气放散控制水平创历史最佳；另外，公司通过降低水管网损耗，推进生活水节水，改善循环水系统水质，全年节约新水 200 万吨。

3.3.3.2 BAT 应用

宝钢十分重视国内外低碳节能 BAT (Best Available Technology) 系统跟踪并大胆采用新技术。2014 年，公司启动钢铁行业低碳节能技术图梳理大项目。2017 年 2 月 28 日，在宝武合并宝钢股份重新鸣锣上市的第二天，宝钢股份举行公司能源与环保委员会年度会议，宝钢股份董事长、总经理等亲自听取汇报并强调宝钢股份四基地加大推进 BAT 应用力度。2018 年 9 月，宝钢股份能源与环保委员会再次组织上海宝山、南京梅山、武汉青山、湛江钢铁四基地主管领导及各二级厂分管领导、工序代表、能源联络员以及宝钢股份中央研究院共 230 余人就已用低碳节能 BAT、最近 3 年计划应用低碳节能 BAT、正在跟踪先进同行或专业机构正在开发的低碳节能技术进行系统的梳理与汇总，以期系统提升宝钢股份低碳节能水平，逼近技术界限能效，同时锁定行业领先百项低碳节能新技术。

表 4 宝钢股份 2017 年重点实施装备节能技术应用及余能回收措施

炼铁工序	✓ 焦炉高温高压干熄焦及配套发电 ✓ 新型焦炉煤调湿技术 ✓ 焦炉荒煤气显热回收★（计划启动） ✓ 烧结烟气余热锅炉 ✓ 烧结机废气点火技术 ✓ 烧结机废气热风烧结技术 ✓ 烧结矿显热竖冷炉回收★（实施中） ✓ 烧结低温余热有机朗肯循环（ORC）发电系统★（实施中） ✓ 高炉干式除尘及 TRT 发电（#2/4 高炉） ✓ 高温熔融渣干法粒化与显热回收★ ✓ 热风炉烟气余热回收 ✓ 高温铁水散热、炉体冷却水显热、高炉煤气显热回收★
炼钢工序	✓ 炼钢汽化冷却 OG 系统 ✓ 机械抽真空技术 ✓ 电炉烟气余热锅炉 ✓ 低热值煤气蓄热式烘烤 ✓ RH 蓄能扩容优化 ✓ 钢包加盖 ✓ 钢坯辐射热回收★
轧钢工序	✓ 炉窑高效燃烧技术 ✓ 空煤气预热技术 ✓ 工艺节能用能源替代★ ✓ 低温烟气余热回收 ✓ 加热炉汽化冷却 ✓ 加热炉富氧燃烧 ✓ 高温烟气余热带钢技术、 ✓ 放散性保护气体回收利用技术
能源	✓ 空压机的级间压缩热收集利用★ ✓ 锅炉排烟显热回收

公辅	✓ 低温余热海水淡化技术用于浓盐水处理★ ✓ 余热回收用于污泥干燥★ ✓ 鼓风、制氧区域冰蓄冷技术 ✓ 区域能源网络等技术★ ✓ 水系统分质供水、串联利用 ✓ 区域内雨水进行回收，减少取水量（湛江基地） ✓ 全面应用大型水泵、风机变频驱动技术 ✓ 节电 LED 照明系统
----	--

注：★属于突破性技术

表 4 是宝钢股份 2017 年重点实施的装备节能技术应用及余能回收措施，当年实现技术节能量 8.87 万吨标煤，合同能源项目计划实施 11 项，三烧 ORC 发电、原料大棚光伏发电以及电炉余热回收项目建成投产，进一步促进了公司能源利用水平的进步。宝钢湛江基地 2017 年完成“焦烧区域余热蒸汽效能提升”、“改善厚板 LDG 混合装置能力”、“电厂低负荷‘两磨’运行”等节能项目，全年可节标煤 9.9 万吨。其中仅“焦烧区域余热蒸汽效能提升”一个项目，利用新增 40 吨燃气锅炉，每月可多发电 625 万度，全年节标煤量可达 1.62 万吨。宝钢湛江基地还充分利用当地丰富的雨水资源，改变了传统“1+1”（市政供水+污水回用）用水模式，建设 2 座总容积 120 万立方的雨水收集池，集雨水收集、排洪、安全贮水、区域隔离等功能为一体，保证全厂供水需求，并大大减少对周边鉴江水的消耗。

3.3.3.3 研发新技术

宝钢几十年坚持技术创新，在钢铁低碳节能领域取得了许多国际上独一无二的技术成果，同时通过工艺流程节能技术、低碳能源替代技术的开发，助力公司低碳工艺路径探索。这里仅例举若干案例。

【焦炉荒煤气显热回收】早在 2011 年，宝钢便开始“焦炉荒煤气显热回收”课题研究。本着小空间、高效率、低成本、长寿命的研发目标，制订了理论实验、结构设计、系统设计、中试试验的研发路线。先后完成了煤焦油粘度与温度关系、抑制焦油结焦等技术领域的理论研究，克服焦炉顶部空间狭小、荒煤气中焦油的积碳和腐蚀、上升管换热器的高效换热结构设计等困难，制作出具备耐高温防腐蚀长寿命、占地空间小、抑结焦、高换热效率等优点的上升管高效换热器。2015 年，该系统正式投入使用，并通过了中国炼焦行业协会组织的专家评审组鉴定。评审组认为，宝钢实现了焦炉荒煤气显热高效稳定回收，对于加快中国钢铁工业节能减排技术创新步伐，提升炼焦工序余热资源利用水平和降低工序能耗，有着积极的推动作用，且具有广泛的推广价值。焦炉荒煤气显热回收系统运行后，每生产一吨焦炭，系统可回收热量 200~277 兆焦，炼焦工序能耗可下降 6~9 千克标煤，节能减排指标达到国际先进水平，而且炉顶作业环境也将得到有效改善。

【烧结矿显热竖式冷却回收发电技术】烧结工序能耗占吨钢综合能耗 10%以上，而烧结矿显热带走的热量占烧结工序能耗的 40%以上，且需消耗大量电能鼓风机强制冷却。国内天津天丰钢铁有限公司与中冶东方合作开发该技术，并于 2013 年底施工建设，2014 年 8 月 20 日正式投产，装置规模可冷却 360t/h 烧结矿（含返矿），年处理烧结矿 240 万吨，余热发电量为 27kWh/t 烧结矿。

宝钢股份梅钢炼铁厂考察该技术后估算发电收益在 13 元以上/t 烧结矿，并决定在 198m² 烧结机改造项目中应用该技术，该工程于 2018 年 4 月 2 日进行热负荷试车，在天津天丰项目基础上，又有较大改进。该技术不仅节能、减少二氧化碳排放，还因烟气全密封而减少传统烧结机环形冷却的漏风带来粉尘大量无组织排放；另外，天津天丰实测数据表明，烧结矿由急冷改为缓冷，还可提高烧结矿转鼓强度。行业专家鉴定认为该技术是中国首创、一项值得推广的低碳清洁技术，有望成为流程主流技术。该技术若与烧结工序脱销耦合，其冶金效果更加明显。若按 6 亿吨产铁量计算其行业贡献，可给钢铁行业带来近百亿/年的净效益，节能量达 570 万吨标煤，二氧化碳排放减少可达 1400 万吨。

【1580 热轧智慧能源】宝钢股份 1580 热轧产线投产于上世纪 90 年代，年产热轧卷 400 万吨，该产线自动化、信息化建设基础较好，但与世界一流水平相比，产线自动化率、产品质量和关键消耗指标等仍存在一定差距，具有一定的提升空间。宝钢股份 1580 智能车间改造提升项目，是我国钢铁业唯一正式入围国家工信部《2015 年智能制造试点示范专项行动实施方案》试点示范的项目。1580 智能车间改造从智能装备、智能工厂与智能互联等层面分层推进，每个层面选择试点项目，逐步探索和积累经验。以工业互联网数据集成、混合模型与数据分析、多目标交互优化、智能机器人等为支撑技术，通过无人化板坯库、全流程质量监控、智能点检等开展智能化车间的探索与实践，在工艺控制、物质能源协同化、劳动效率提升等多个领域，实现管控智能化、预测预警前瞻应变、业务协同多目标优化等智能化应用，提升产线的制造稳定性和灵活性，降低制造成本。该项目完成时，1580 智能车间能源利用率、全自动轧钢率、劳动效率预计将分别提升 5%、6% 和 10%，成本下降 20%，钢铁制造将更安全、更高效、更环保，预计年经济效益超过 3200 万元。改建后的 1580 热轧产线将成为具有国际竞争力的热轧产线，并形成若干智能工厂核心技术和钢铁智能制造实践方法体系，为我国钢铁工业的转型升级提供经验。

【宝钢新一代离线淬火装备技术开发】公司自主开发了基于控冷技术的新一代钢管水淬设备，已于 2017 年在相应机组成功上线运行，实现 15 万吨级批量应用。新一代设备上线后，水泵电耗下降 33%~50%，冷却时间缩短 15~20%，实现在冷却能力大幅提升同时明显节约用水量。

3.4 CCUS

3.4.1 国外

3.4.1.1 ULCOS

超低二氧化碳炼钢项目（ULCOS）于 2004 年开始启动，来自欧洲 15 个国家共 48 家企业和机构参与到该项目。ULCOS 项目主席由安赛乐·米塔尔公司担任，指导委员会由欧洲主要钢铁公司组成，包括安赛乐·米塔尔公司、蒂森·克虏伯欧洲钢铁公司、塔塔欧洲钢铁公司、萨尔茨吉特-迪林根公司、劳塔鲁基钢铁公司、瑞典钢铁公司。ULCOS 项目研发团队制定的目标是开发出比现在 CO₂ 排放量至少减少 50% 的钢铁生产突破性技术。

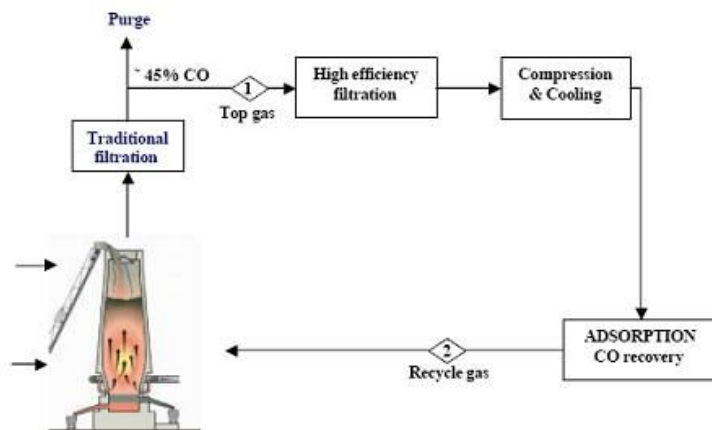


图 7 安赛乐米塔尔 Eisenhüttenstadt 钢厂 CO 分离示意图(TGR-BF)

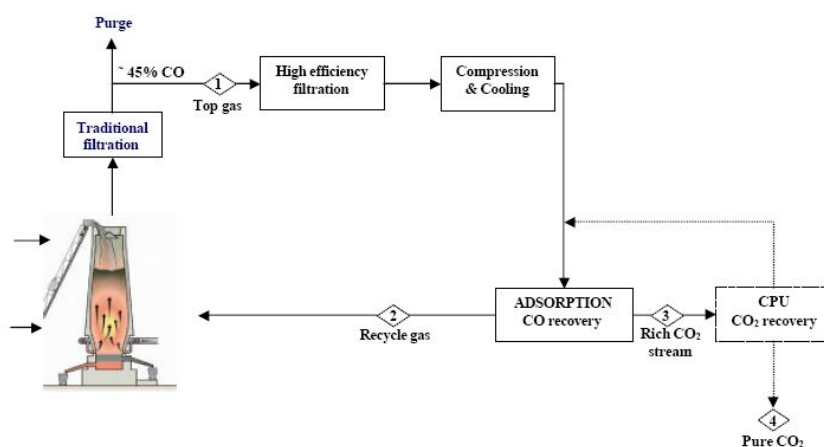


图 8 安赛乐米塔尔公司 Florange 钢厂 CO 和 CO₂ 分离示意图

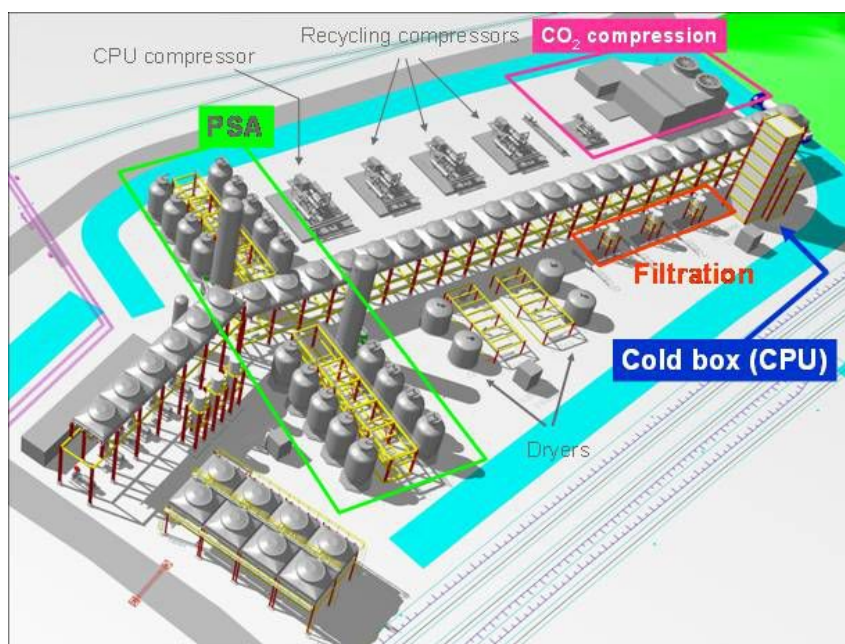


图 9 安赛乐米塔尔公司 Florange 钢厂的 CO/CO₂ 分离系统布置图

高炉顶部煤气循环（TGR-BF）是 ULCOS 项目的一项重点新技术。欧盟瑞典冶金研究所（MEFOS）的模拟试验高炉附近建立了小型气体分离设备，并进行了前期试验。继而，该技术在安赛乐米塔尔 Eisenh 高炉附近建立了中试装置。EHS 钢厂产能为 70 万 t/a 的高炉实验（图 7）主要研究炉顶煤气循环工艺及闭环操作的可行性。项目第二阶段的中试是在安赛乐米塔尔公司 Florange 钢厂较大高炉上进行（图 8），CO₂ 的纯化通过烟气净化压缩系统实现，如图 9 所示。

3.4.1.2 COURSE50

COURSE50 是为减少炼铁过程中 CO₂ 排放，开发了氢还原炼铁法以及从高炉煤气中分离回收 CO₂ 两项支柱技术，整体目标是在将炼铁过程产生的 CO₂ 减少 30%。氢还原炼铁法是将现在使用的还原剂焦炭的一部分替换成氢，减少高炉 CO₂ 排放的技术，氢还原炼铁法的目标是减排 10% 炼铁过程产生的 CO₂。高炉煤气中分离回收 CO₂ 技术的目标是减排 20% 炼铁过程产生的 CO₂，项目同时开展化学吸收法和物理吸附法 CO₂ 分离回收技术开发，目标是降低 CO₂ 分离回收成本，成本是控制在 2000 日元/吨以下。

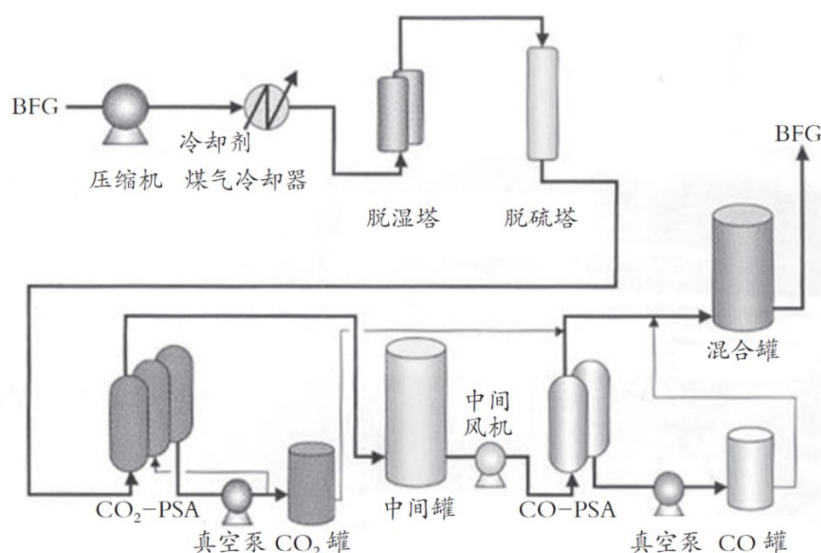


图 10 ASCOA-3 流程图

JFE 受 NEDO 组织的 COURSE50 项目委托在福山厂建立试验设备，开展 ASCOA-3（Advanced Separation System by Carbon Oxides Adsorption-3t）实验。ASCOA-3 是用物理吸附法分离回收 CO₂ 的小规模试验设备，处理能力 3t CO₂/d，约每小时 300m³ 烟气体量。如图 10 所示，PSA 运行时，仅仅依靠吸附、解吸还不能获得高浓度的 CO₂，所以加入了清洗过程，包含吸附塔、清洗塔和解吸塔 3 个塔，各塔每 100s 连续替换操作。吸附加压 100~200 kPa，解吸由真空泵来完成，将分离回收 CO₂ 的 3 个塔称为 I 段 PSA，各塔尺寸为直径 750mm 为高度 1200mm。分离回收 CO₂ 后的煤气经中间塔送到 II 段 PSA，用 CO 吸附剂回收 CO。II 段 PSA 有 2 个塔，各塔尺寸为直径 900mm 尺高度 1755mm。由 II 段 PSA 分离回收的 CO 气体可作为热源再利用。传统技术的分离回收成本约 4000 日元/t，JFE 分离回收成本的目标是降低一半，至 2000 日元/t（120 人民币/t）。为进一步降低分离回收成本，进行了相关研究，设备费为 4.3 亿日元。

2011 年验证实验室研究成果和开展降低成本的相关试验, 2012 年进行了综合运行。同时, 试验课题还研究了高炉煤气中的微量成分对吸附性能和耐用性的影响。

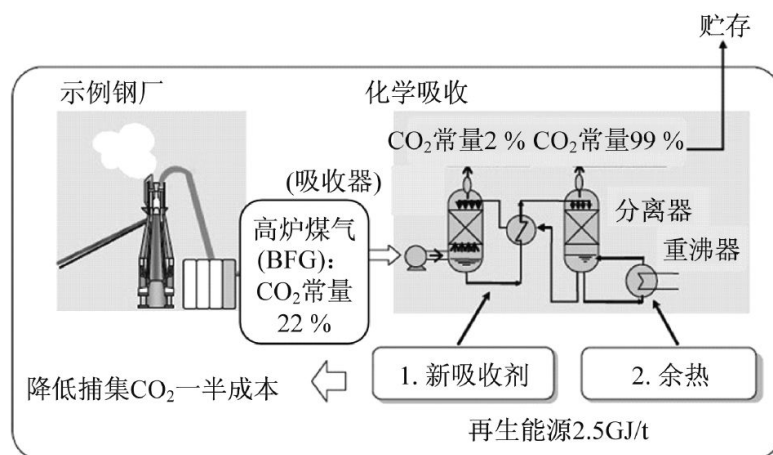


图 11 COCS 项目流程图

日本地球革新技术研究所 (RITE) 计划并实施了 COCS 项目, 目的是降低捕集高炉煤气中的 CO_2 成本, 期望可以降到常规化学吸收法的一半, 主要途径是开发出新的吸收剂, 以低的能耗去除 CO_2 并开发余热利用技术回收钢厂余热, 为 CO_2 捕集提供低成本蒸汽。该项目的流程如图 11 所示。新日铁君津厂建造了 CO_2 捕集能力为 1t/d 、处理烟气量为 $100\text{ m}^3/\text{h}$ 的试验装置, 如图 12 所示。吸收剂再生炉用钢厂蒸汽进行加热, 再生温度控制在大约 120°C 。以使用 30%MEA 水溶液作吸收剂和使用厂内蒸汽为基准, 预期成本为 6000 日元/t。然而, 使用自己开发的吸收液 RITE-5 和 RITE-6 成本预计在 3000 日元/t。



(Kimitsu Works, Nippon Steel Corporation)

图 12 新日铁君津厂内的化学吸收法设备

3.4.1.3 浦项 CCUS

韩国浦项制铁开发利用氨水分离高炉煤气中的 CO_2 技术，该技术路径如图

13 所示。通过回收厂内排放的中低温余热，以提供 CO_2 再生所需要的能量，从而实现低成本分离 CO_2 。浦项从 2006 年开始启动技术研发，到 2008 年 12 月开始进行了第一阶段中试试验，规模为 $50 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 高炉煤气。 CO_2 捕集率超过 90%，纯度达到了 95% 以上。2010 年实施了第二阶段中试试验，规模为 $1000 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 高炉煤气。2011 年 7 月，设立试验工厂，2012 年建立了回收 CO_2 的液化储存设备。大型设备投产后，每年有望捕集 30 万吨 CO_2 。

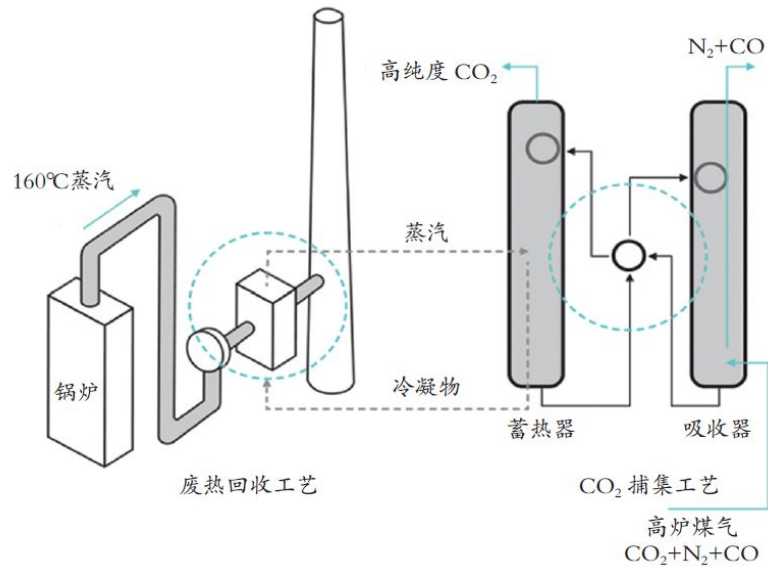


图 13 利用 NH_3 捕集高炉煤气中 CO_2

除了化学吸收法，浦项同时也在 2011 年开始研究 PSA 技术，该技术从煤气中分离 CO 和 CO_2 ，并进行最佳分离工艺和吸附剂的研发工作。浦项搭建了一个小型试验平台，规模为 $1 \text{ Nm}^3/\text{h}$ ，如图 14 所示，可以吸附分离出纯度达到 99% 以上的 CO ，2014 年在生产现场进行应用研究。计划 2016 年以后，在现场建立 $100 \text{ Nm}^3/\text{h}$ 以上的大型中试装置，真正实现纯度为 99% 以上的商业化生产目标。

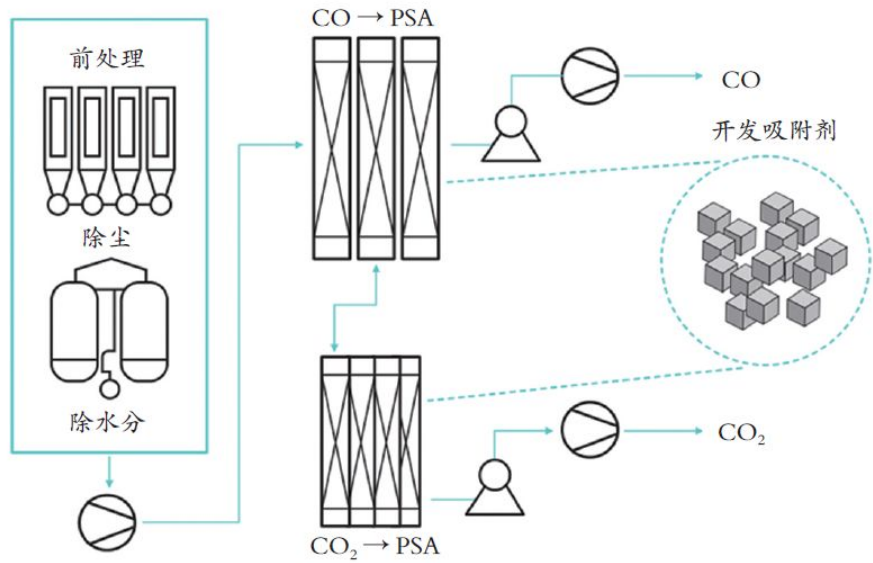


图 14 PSA 变压吸附最佳分离技术

3.4.2 国内

3.4.2.1 石灰窑烟气捕获 CO₂

宝钢曾在 2004~2008 年期间，回收石灰窑烟气中 CO₂ 用于转炉炼钢底吹研究。该项目采用化学吸收法，基于改良 MEA 化学吸收剂，开展了小试研究，规模为烟气量 40L/h。京唐钢铁公司利用国家项目与北京科技大学合作开展转炉底吹 CO₂ 实验，后续计划建立石灰窑烟气捕集 CO₂ 装置，一期规模设计为 5 万吨/年。

3.4.2.2 高炉煤气提取 CO

衡阳钢管建成世界上第一套高炉煤气分离 CO 的 PSA 法大型工业装置，如图 15 所示。该装置烟气处理规模为 67000 Nm³/h，采用单层分散性 CuCl 分子筛吸附分离 CO。项目投产后各项指标均优于设计值，产品气 CO 收得率大于 70%，浓度为 70%，热值 8700~8800 kJ/m³。扣除装置运行成本后，每年为衡钢节约 2.9 万吨标煤，年创收达 2500 多万元。以获得一立方米 CO 估算，考虑到设备折旧与消耗，成本约在 0.5~0.6 元/立方米产品气。

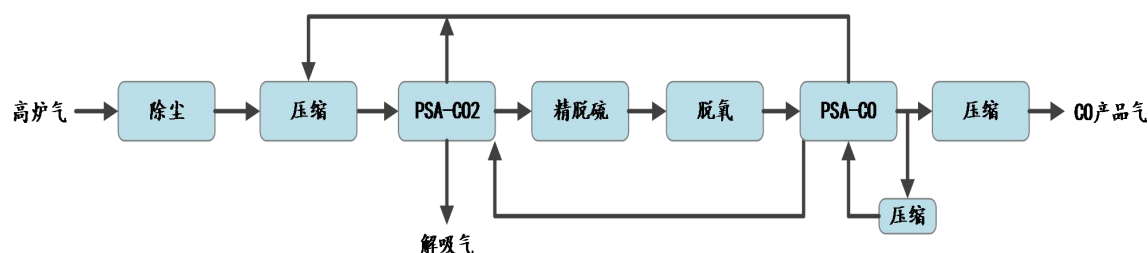


图 15 衡阳钢管高炉煤气热值提升技术路径图

3.4.2.3 副产煤气产品化

四川达钢建立了规模为 10 万吨/年的焦炉煤气配加转炉煤气制甲醇生产线。结合达钢焦炉煤气用户多，而转炉煤气、高炉煤气又有富余的生产实际，为了进一步有效利用资源，减少废气排放，达钢大胆创新，制定了用转炉煤气混入焦炉煤气用于焦炉加热而置换更多焦炉煤气生产甲醇的工艺改造方案。达钢与天一公司联合开发了 TSA（变温吸附法）工艺净化转炉煤气，可使其硫、磷、氟及其化合物含量从 1~500mg/m³ 降至 0.1ppm 以下，砷及其化合物降至 5ppm 以下，满足甲醇合成要求。其工业流程如图 16 所示，该工艺在预处理过程实现 CO₂ 分离。另外，包钢和柳钢目前也在计划对高炉煤气/转炉煤气/焦炉煤气中 CO/H₂/CO₂ 等提取，合成高附加值化工产品，提升副产煤气利用价值。

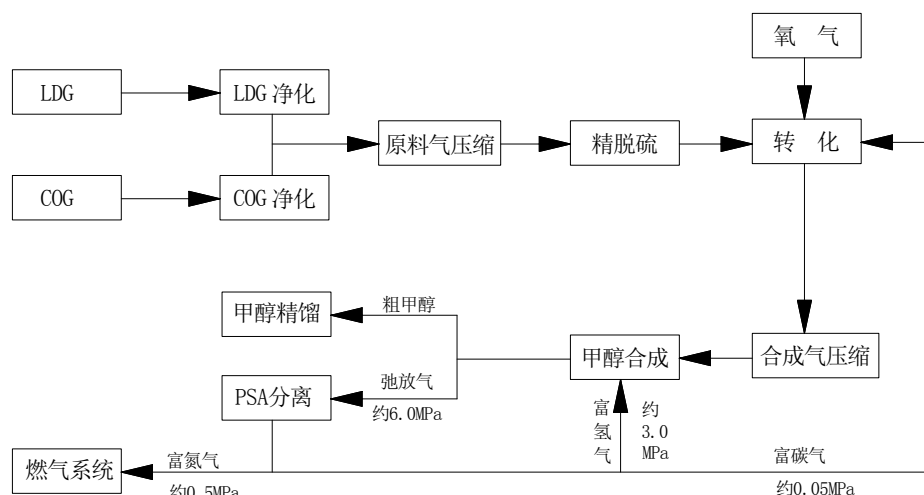


图 16 达钢制甲醇工艺流程图

2010 年 6 月，宝钢与新西兰朗泽公司（LanzaTech）合作，同时结合中科院膜分离技术、发酵工艺，在宝钢罗泾地区，利用 COREX 炼铁装置所产生的煤气制乙醇，该项目中试阶段计划年产无水乙醇 300 吨。2011 年 3 月 27 日工程奠基，经过近一年的建设，300 吨/年“钢厂 COREX 煤气制乙醇”中试示范项目于 2012 年 4 月初正式投运，初步完成了中试阶段的试验目标，成功生产出了无水乙醇样品。2012 年由于罗泾钢厂停产后试验中止。2012 年，台湾中钢公司、新西兰朗泽公司合作，利用转炉气、高炉气、焦炉气为原料，再使用朗泽科技的生物菌种发酵技术制乙醇。2012 年，首钢京唐公司亦与朗泽公司合作，引进煤气发酵制燃料乙醇技术，实施年生产燃料乙醇 300 吨技术示范工程。该示范工程以高炉煤气、转炉煤气、焦炉煤气及其彼此间的混合气体为原料，通过微生物发酵工艺，生产汽车及航空用燃料乙醇产品。项目占地约 5000 平方米，具有包括气体预处理、生物发酵、酒精提纯、污水处理等全工艺流程，通过项目示范形成可商业化规模应用的钢铁工业煤气发酵制燃料乙醇核心技术。

2013 年 3 月 14 日，唐钢与美国哈斯科集团签订了乙醇项目合作框架协议。双方决定共同建设利用微生物技术将转炉煤气制成燃料乙醇项目。发酵法制乙醇是利用微生物技术将转炉煤气制成燃料乙醇，与目前国内大多数钢铁企业将富余转炉煤气主要用于燃烧加热或发电相比，具有更加清洁、高效的优点。根据协议，此项目建成后，具有日处理 65 万立方米的转炉煤气制乙醇能力，CO₂ 排放量降低近 30%，经济效益将是原来的 2 倍。

3.4.3 BAO-CCU

3.4.3.1 概念流程

钢铁行业已有的 CO₂ 捕获案例主要集中在分离技术研究，目标是通过降低分离成本实现 CCS 的可持续发展，对 CO₂ 的经济性利用技术研究较少，若按传统的 CCS 实施地质封存或海洋封存，除了 EOR（Enhanced Oil Recovery）技术有部分的经济效益之外，很难有经济效益。国际钢铁同行的主流观点是：为实现碳减排，若通过常规 CCS 技术，钢企将面临巨大经济压力。为此，宝钢重点研究 CCU（Carbon Capture and Utilization），该概念流程，如图 17 所示，以

厂内余热资源为驱动力，将低成本捕获后的 CO_2 和高炉提质气以经济的方式多重利用，在实现碳减排的同时，创造复合经济效益。对比分析化学吸收法和变压吸附法各自优缺点和经济性后，提出利用钢厂余热资源作为化学吸收法实施碳分离与捕获的能量来源，获得高纯度 CO_2 产品气，同时提升单位体积高炉煤气热值。理想状态下， 1 m^3 的高炉煤气可提取分离 $0.18 \text{ m}^3 \text{CO}_2$ ，同时得到 0.82 m^3 热值为 4100 KJ/m^3 的高炉提质煤气，高炉提质气可用于焦炉工序或电厂 CCGT 机组。 CO_2 用于顶吹转炉炼钢，减少铁蒸发与烧损，降低烟尘量，用于转炉底吹替代氮气、氩气，用于 VOD 与 AOD 等精炼工序，用于高炉炼铁煤粉输送和 CO_2 喷吹，用于替代氮气用于管道吹扫，用于海藻固碳制取生物燃料，用于化工生产原料等。

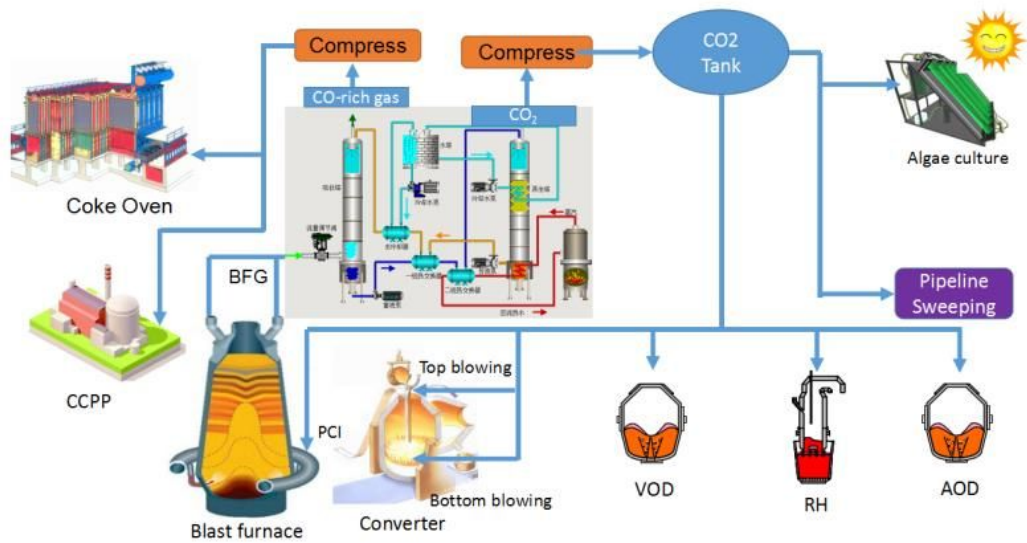


图 17 具有宝钢特色的 CCU 技术路线图

3.4.3.2 模块化 CCS 技术

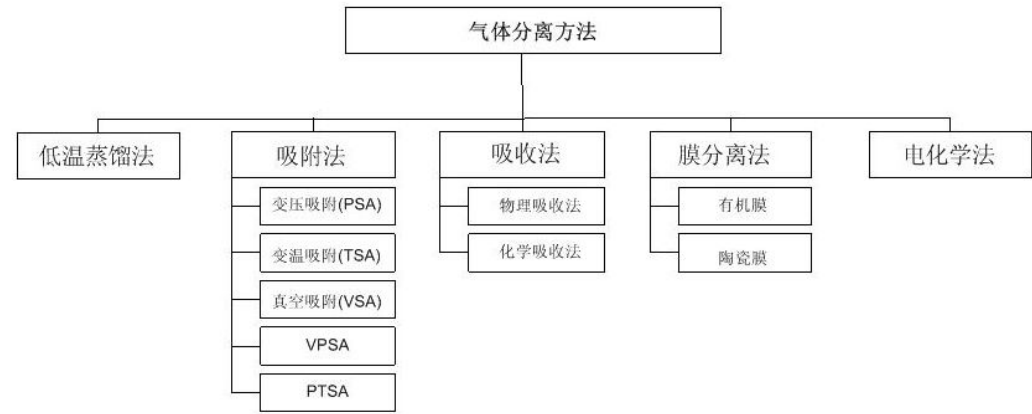


图 8 常用的几种气体分离方法

从欧盟 ULCOS 和日本 COURSE50 看, CCS 的不同主要在于提纯 CO 和分离 CO₂ 的方法, 如图 18 所示, 有低温蒸馏法、吸附法、吸收法、膜分离法和电化学法等。每一种方法还有具体分类, 如吸附法还有 PSA、TSA、VSP、VPSA、PTSA 等。高炉煤气中主要成份之一是 CO, CO 分离方法见表 5, CO₂ 分离方法见表 6。

表 5 分离 CO 方法的比较

	变压吸附提纯 CO	深冷分离 CO	膜分离 CO
装置组成	吸附塔、仪电控系统、真空泵等组成, 设备简单。	预冷机组, 纯化器, 膨胀机, 主换热器, 冷箱, 冷凝器, 电控, 仪控等设备组成, 设备复杂。	预处理系统、膜分离器组件、换热器等组成, 设备简单。
工艺特点	负荷调节方便、开停车速度快、运行维护费用低, 负荷调节灵活; 装置临时停车后可立即再开车即可保证 CO 产品纯度要求。	工艺流程复杂, 装置负荷调节比较困难; 装置开停车时间长、难度高, 运行维护费用高; 装置短时间停车后再开车需 10 小时左右才能得到 CO 产品气。	工艺流程简单, 对预处理要求较高。负荷调节灵活, 开停车速度快; 装置临时停车后可立即再开车即可保证 CO 产品纯度要求; 装置长时间停车不影响工况, 可立即投入使用使用。
对原料气适应性	原料气适应性广, 可实现 CO 与 N ₂ 有效分离; 可在较低操作压力下, 减少原料气增压能耗巨大浪费。	由于沸点相近, 难以实现 CO 与 N ₂ 的有效分离; 需在较高的操作压力下进行, 必须对原料气在现有基础上进行压缩, 能耗大。	对于高氮气含量的 CO 混合气体, 膜法没有成功分离 CO 与 N ₂ 应用实例。
装置投资	装置投资低	装置投资成本高	对原料气净化要求较高; 膜的使用寿命短, 更换费用高。

表 6 分离 CO₂ 方法的比较

	化学吸收法	吸附分离法	膜分离法	低温蒸馏法	电化学法
优点	技术成熟, CO ₂ 产品纯度高, 反应解析温度低	技术成熟, 操作弹性大, CO ₂ 产品质量稳定, 适合高浓度 CO ₂ 处理	模块化设计, 安装维护方便, 适合高浓度 CO ₂ 处理。	技术成熟, 流程简单能够产生液态的 CO ₂ , 以便于管道输送。	在燃料电池方面的应用有广泛的技术基础; 从烟气中分离 CO ₂ 费用较低; 装置体积小。
缺点	胺液易氧化, 溶液循环量大, 吸收塔与再生塔高度较高, 占地面积大	产品纯度低, 回收率低, 且吸附解吸频繁, 要求自动化程度高。	技术不成熟, 产品纯度低, 常规膜组件易堵塞, 寿命短	该方法设备庞大、能耗较高。	技术不成熟, 熔融碳酸盐是一种糊状腐蚀剂, 其制作和操作都很困难; 烟道气中的 SO ₂ 也会毒化电池; 电解质隔离和电极退化。

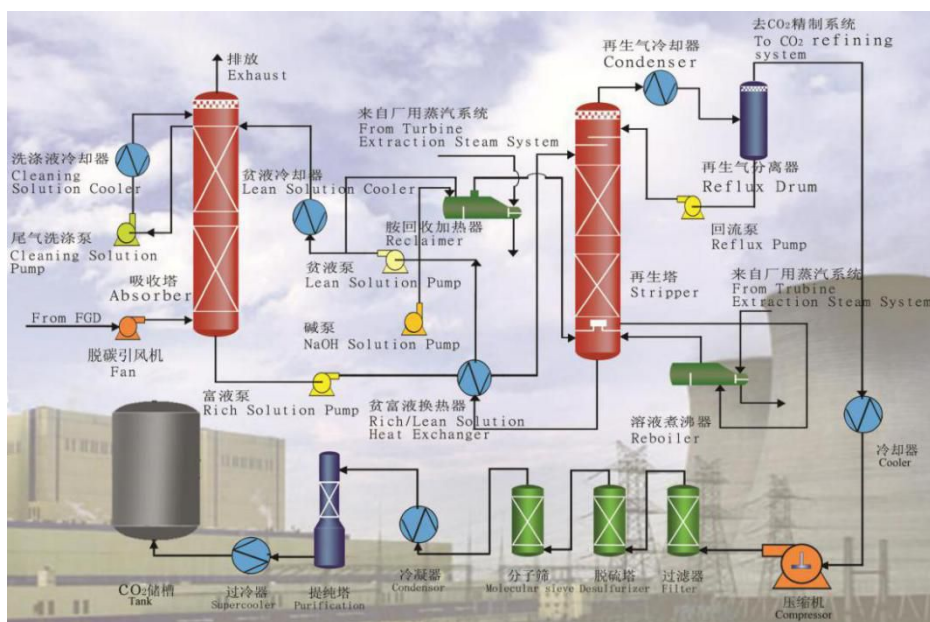


图 19 上海石洞口电厂 MEA 法 CO₂ 分离装置系统图

神华集团为在内蒙古鄂尔多斯的煤直接液化项目配套了 CO₂ 捕集装置，采用 MEA 为吸收剂的化学吸收法；中电投集团已于 2010 年 1 月建成投产重庆合川双槐电厂年捕集 1 万吨高纯度 CO₂ 装置，采用 MEA 为吸收剂的化学吸收法；华能的首座燃煤电厂烟气 CO₂ 捕集示范工程，年捕获 3000 吨 CO₂，华能的另一个项目是上海石洞口第二电厂碳捕获项目，年捕获 12 万吨 CO₂，如图 19，均采用化学吸收法。宝钢开展 CCUS 研究，探讨工程方案，首选成熟可借鉴的模块化技术；在与 World Steel 专家探讨 CCUS 流程技术成熟度，CCS 模块技术应该可以认为已达到工业化条件。

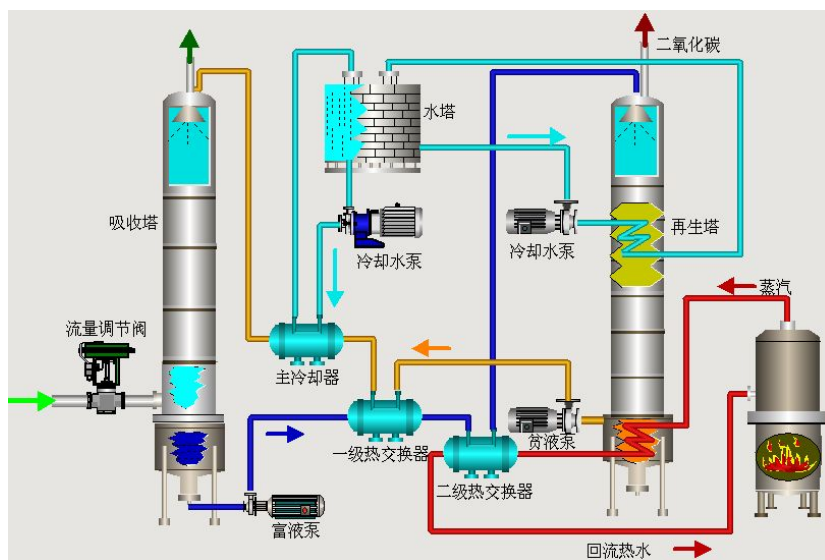


图 20 高炉煤气化学吸收法脱碳工艺流程示意图

高炉煤气化学吸收法工艺流程如图 20 所示。净煤气经过间歇式脱硫塔脱硫，脱硫后的气体经过盛有消石灰的吸收塔，混合气中的 HCl 和部分 CO₂ 被吸收后

直接进入吸收塔，这可减少有机胺溶液的失效。胺液从吸收塔上部喷淋，在下降过程中与上升的混合气在填料上接触，形成气液传质膜，充分反应吸收，当混合气到达吸收塔顶部时，混合气中 CO_2 被吸收干净，排出热值较高的富 CO 气体。吸收 CO_2 达到饱和的富液经泵泵入解吸塔，自上向下喷淋，同时，溶液被不断加热，解吸出来的 CO_2 经过解吸塔塔顶被冷却器冷却，直接加以利用，富液在下降过程中，逐渐失去 CO_2 成为贫液，当到达底部时，温度最高，同时含有的 CO_2 最低，再经过泵泵入吸收塔塔顶循环利用。

3.4.3.3 CO_2 利用

(1) CO_2 用于转炉炼钢

从 20 世纪 80 年代开始，国内外科研工作者开始开发底吹 CO_2 的新技术，其冶金价值在于：1) 脱磷要求的强动力学搅拌；2) 减少氩气消耗；3) 抑制钢水过氧化现象。欧洲、日本及澳大利亚是利用 CO_2 进行复吹成熟的国家，宝钢也曾试验过该技术。日本底吹 CO_2 主要采用转炉底吹 $\text{N}_2\text{-CO}_2$ 切换技术、底吹 N_2+CO_2 混合气体以及全程底吹 CO_2 技术，如福山厂的 180 吨和 250 吨转炉从上世纪开始应用底吹 CO_2 技术，降低了生产成本，改善了高碳钢脱磷。住友转炉废气作为底吹气体以 $1500\text{m}^3/\text{h}$ 的流量供给转炉作为底吹气体直到开始出钢，使烟气体积百分数为 71.1% CO 、15.2% CO_2 、10.5% N_2 、3.2% H_2O ，提高了煤气质量。

工程应用时，设计转炉炼钢过程混合喷吹一定比例的 CO_2 来实现对炼钢过程温度和氧化性的调控，为选择性氧化反应的进行创造良好的热力学条件；同时利用 CO_2 参与熔池反应可产生更多的气体，强化熔池搅拌能力，为炼钢过程创造良好的动力学条件。考虑到转炉冶炼过程顶吹气体中平均混入约 10% CO_2 ，顶吹全程采用氧气和 CO_2 的混合气体，混合比例可根据炉况进行调节，比例为 0~20%，设计流量为 0~12000 Nm^3/h 。宝钢股份宝山基地转炉吨钢 CO_2 顶吹喷入量为 5 Nm^3 计算，每年可消耗 CO_2 27000 万 m^3 ；底吹采用 CO_2 完全代替 Ar，每年可消耗 CO_2 约 1120 万 m^3 。

(2) CO_2 替代氮气

钢铁生产使用的氧气、氮气、氩气主要由空气分离装置生产，宝钢宝山基地有七套制氧装置，最大制氧能力约为 31 万 m^3/h ，制氮能力约为 57 万 m^3/h ，气体生产主要根据用户用量进行调节，当气体产量有过剩时，富裕的部分气体可以进入液化装置液化成液体后，以备装置故障时应急使用，也可作为产品外销以创造效益。但由于空气分离装置制氧、制氮是相伴产生的，一般都以需求量大的一种气体的平衡来组织空分生产，另一种气体富裕时只能进行放散，造成能源损失。

氮气在宝钢各工序得到广泛应用，高压氮气压力 3.0MPa，中压氮气压力 0.6 MPa，中压氮用户主要为高炉、炼钢和冷轧，高压氮用户主要为高炉喷煤、炼钢溅渣等，还有部分用于煤气管道吹扫、气动输送、石灰料仓保护气、CDQ 补充气等；宝钢股份宝山基地是氮气不足，氧气有余。另外，为满足冷轧等高端用户的需求，宝钢生产的氮气纯度为 99.999%，而许多用途并不需要如此高的品质，这些低端的用户完全可以用其它惰性气体来替代。这里，根据氮气用途和使用品

质要求，可以梳理必须使用氮气和可以考虑使用惰性气体或 CO₂ 的用户，如：用于气动输送，保护气、吹扫气等。

（3）CO₂ 化工应用

气体 CO₂ 可用作化工、医药原料、饮料充填剂、制冷剂、惰性介质、溶剂、压力源、焊接保护气、防氧化剂及灭火剂以及油田混相驱油等。CO₂ 的主要用途如下：1) 油田 CO₂ 混相驱油(EOR)。近十年来，采油领域正逐渐成为 CO₂ 的超级用户，随着油田原油采出难度加大，针对提高原油采出率的新工艺不断应用，其最具前景的工艺为 CO₂ 混相驱油工艺。据报到，国内已有多家采油企业正在开展工业试验，平均可提高采收率 20%。仅此一项，其 CO₂ 年需求量可达 50~80 万吨。2) 用作植物气肥。植物叶绿素在光合作用下吸收 CO₂ 成植物淀粉。这是植物生产的自然规律。用 CO₂ 制成气肥，加大植物生长空间中的 CO₂ 浓度，从而达到增产目的。3) 用于超临界萃取。目前国内有关研究部门已经能够利用该技术提纯一百多种生物的精素，尤其是在生物制药领域和食品保健品等方面，国内已经有几套工业装置。4) 代替氟氮烃用作发泡剂。CO₂ 用作泡沫塑料发泡剂比氟氮烃类发泡剂对环境污染小，用量小易于回收利用，无毒可制作降解饮食餐具。5) 用于生产泡沫板材。美国 DOW 化学公司以 CO₂ 为现有聚苯乙烯泡沫板用发泡剂的替代物，已在世界范围内发放这项新技术的许可证。此板厚仅 6~35mm，环境污染小，并具有发泡剂用量少等优点。6) 用于生产白炭黑。白炭黑可由硅酸钠和精制 CO₂ 气体反应制得。它可用作橡胶补强剂，塑料填充剂，润滑剂和绝缘材料等。7) 硼砂。将预处理的硼镁矿粉与碳酸钠溶液混合加热，然后再通入 CO₂，加压后反应即可制得硼砂。8) 轻质氧化镁。白云石经煅烧，硝化处理，再经 CO₂ 碳化、热解等一系列处理后制得轻质氧化镁。9) 用于其它有机化工产品、无机化工产品以及焊接保护气等。

（4）CO₂ 养藻

许多跨国能源公司投巨资开发能源微藻。美国 GreenFuel 公司于 2005 年在 Arizona APS 完成中试，并筹资 2000 万美元在其封闭管式光反应器中试成功的基础上开始进行更大规模工业试验。Shell 公司 2007 年宣布投资 70 亿美元开展微藻生物柴油技术的研究。美国第二大石油公司 Chevron 于 2007 年底宣布与美国能源部可再生能源实验室协作研究微藻生物柴油技术。2008 年 4 月，美国 PetroSun 公司宣布投资开发利用开放池系统培养微藻生产生物柴油的技术，其中部分产品是高品质的航空生物柴油。

典型高炉煤气中除了含有 21-24% 的 CO₂，还含有 20-23% CO 和 50% 左右的 N₂ 等主要成分，利用高炉煤气培养能源微藻技术不仅可以低成本捕获 CO₂，而且可以生产生物燃料。与物理和化学脱碳工艺相比，具有变废为宝，能耗低，且没有二次污染的特点，实现了生物固碳和微藻生物质的积累，为生物能源提供了原料。但是由于高炉煤气成分复杂，在一定范围内变化，且含有成分对藻类可能有害，因此，需要通过调控和优化培养条件提高生物质产率、目标物含量积累以及 CO₂ 去除率。宝钢研究了藻种筛选和扩大培养、小试和中试反应器设计和优化改造、微藻适宜条件的探究，研究将高炉煤气中 CO₂ 用于蛋白核小球藻培养并开展小试规模的微藻固碳产油效率提高。

3.4.3.4 小结

宝钢以高炉煤气为研究对象，在解剖欧盟 ULCOS 项目与日本 COURSE50 项目的基础上，结合华能石洞口电厂、北大先锋衡阳钢管、四川达钢以及北京科技大学与首钢京唐将 CO₂ 用于转炉炼钢等成功的 CCS、副产煤气利用以及 CO₂ 利用的模块化技术，形成宝钢版 CCUS。通过自搭建的实验平台研究、数值模拟和系统设计计算，对比研究了不同气体分离技术在高炉煤气热值提升与碳捕获领域应用的优缺点，并对分离后得到的不同气体产品提出了综合利用技术路径设想，在提升高炉煤气利用价值的同时实现 CO₂ 利用，减少排放。宝钢版 CCU 包含：1) 变压吸附法和化学吸收法从高炉煤气中分离 CO₂ 的模块化技术比选；2) CO₂ 捕获后，热值提升的高炉提质气用于焦炉燃烧室，替代高热值燃气用于电厂 CCGT 机组增加出力；3) CO₂ 用于炼钢工序，包括在转炉吹炼中的应用和连铸系统中的应用；4) CO₂ 用于微藻养殖和固碳获取生物燃料技术方案；5) CO₂ 用于部分替代氮气的技术方案。

3.5 碳汇

宝钢在探索绿色产品、绿色制造、CCUS 的同时，还研究利用钢厂低品质、难回收的余热协同处置生物质能、城市有机废弃物，提高非化石能源利用比例，同时制备生物质碳以实现碳汇。

3.5.1 钢厂余热与生物质能

钢铁企业有丰富的余热资源，实现回收利用的经济性和可行性同时不断提高能源利用效率是其未来发展的主要方向。钢铁余热按载热体形态的不同，分为固体余热（如：焦炭、炉渣、烧结矿、球团矿、连铸坯），液体余热（如：冲渣水、冷却水、冷凝水、排污水）和气体余热（如：焦炉、高炉、转炉煤气，废烟气，蒸汽、压缩空气）；按余热温度不同，分为高温显热（气体温度高于 400℃、液体高于 200℃、固体高于 700℃）、中温显热（气体温度介于 250~400℃、液体介于 120~200℃、固体介于 400~700℃）和低温显热（气体温度低于 250℃、液体低于 120℃、固体低于 400℃）。钢铁企业余热资源按应用普及程度和成熟性也可分为：一是品质较高且稳定、回收利用可行性高的余热资源，如各类煤气、高温烟气余热等，目前已得到较为充分的回收利用，如何进一步提高能效是其未来发展的主要方向；二是品质略低但技术成熟、具有回收利用可行性的余热资源，如焦化烟道余热、烧结大烟道余热、高炉冲渣水余热、空压机余热、循环冷却水余热等，目前应用普及率仍较低，进一步推广普及，同时不断提高能源利用效率是其未来发展的主要方向；三是现阶段仍处于研究阶段、回收利用尚有一定障碍的余热余压资源，进一步加强研发力量，实现回收利用的经济性和可行性是其未来发展的主要方向。

过去几十年，由于技术、资金的限制，钢铁行业余热回收利用常常更多聚焦在高品质、技术易实现的余能余热资源上，对于较低品位的余能余热资源的回收利用较少，如何进一步挖掘节能潜力，突破“瓶颈”是目前很多企业面临和亟待解决的问题。例如：温度在 800~1000℃ 转炉烟道气余热，温度 800~900℃ 加热炉烟气余热，温度 650~700℃ 的焦炉荒煤气显热，温度 500℃ 左右热风炉排烟，温度在 300℃ 左右的烧结烟气余热均是行业热点与难点，有的尚在研究新回收技

术，有的尽管已回收，但回收利用效率不高或回收效益不佳。

生物质资源作为一种可再生能源，是仅次于煤炭、石油、天然气的第 4 大能源，在整个能源系统中占有重要的地位。生物质作为一种清洁的可再生能源，具有污染物排放低和减排 CO₂ 等优点，近年来得到了各国的普遍重视。2015 年我国政府工作报告首次提出大力发展生物质能源，2016 年政府工作报告强调完善生物质能等发展扶持政策，发展生物质能源将成为我国产业政策的重点支持方向。然而，由于生物质自身的分散性大、水分高、能量密度低以及不易储存等缺点，限制了其大规模工业化利用，因此选择合理的预处理方式解决生物质利用中存在的瓶颈问题已成为当前的研究重点。充分利用钢厂余热资源，为不同类型的生物质能热解炭化提供全部或部分热源，用于生物质干燥，低温炭化，可实现这类余热的充分高效利用；同时为钢厂充分利用生物质能，减少钢铁企业对不可再生煤炭资源的依赖，降低钢铁企业的生产成本和投入环保设备的运行成本，减弱因燃煤和秸秆燃烧带来雾霾天气的恶劣影响，为我国能源的可持续发展和我国钢铁企业转型升级寻找新的路径。

3.5.2 生物质碳与碳汇

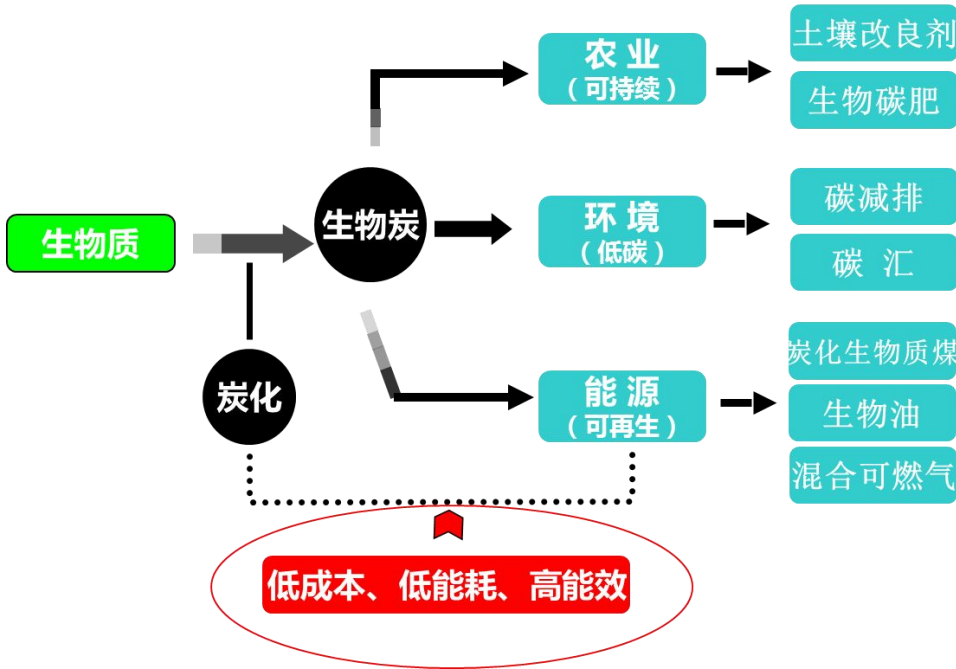


图 21 生物质炭利用

生物炭 BC (Biochar) 是在有限氧或无氧条件下对生物质进行热裂解产生的富碳固体物质，2007 年在澳大利亚第一届国际生物炭会议上取得统一命名，它可用作可再生能源，也可用于土壤改良剂和炭肥并实现碳汇，如图 21 所示。国内根据用途将 Biochar 译为生物炭、生物质炭、生物质焦。由于其具有较高的抵抗生物和非生物降解的能力，能够长期稳定地封存在土壤中，具有巨大的碳封存潜力，增加土壤有机碳 (SOC) 含量，被认为是能够获得碳封存和修复退化土壤双重效益的有效途径。

如图 22 所示，以废弃生物质慢速热裂解技术生产得到的生物炭几乎是纯碳，是稳定的碳固定载体，如果单纯将生物炭作为燃料燃烧使用，会将生物质通过光

和作用固定的碳再释放到大气中，但这是用可再生能源替代化石能源。如果将生物炭作为土壤改良剂或肥料增效载体使用，生物炭可将生物质固定的 CO_2 以生物炭形式固定于土壤，并影响土壤碳、氮转化，降低土壤温室气体 (CO_2 , CH_4 及 N_2O) 排放，可实现碳的固定及 CO_2 减排，这是碳汇。

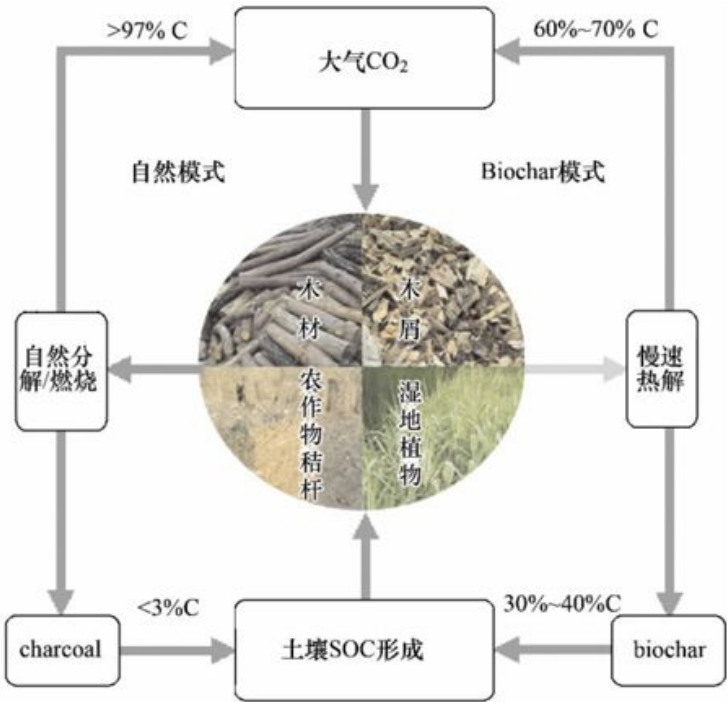


图 22 生物质能与碳汇

1 吨生物炭，按照 60% 含 C 量计算，其中 2% 生物炭在土壤中以 CO_2 形式逸出，剩下 58% 以稳定的碳形式存在，相当于 2.15 吨 CO_2 被封存。生物炭在土壤中可以保持长达百年至数千年，等于把碳封存进了土壤，过程为“碳负性”。康奈尔大学的生物炭研究者们估算，生物炭很容易实现 10 亿吨/年 CO_2 的碳汇，如果大规模用生物炭实现碳汇，可以帮助减缓全球气候变化。

3.5.3 宝钢方案

钢铁企业丰富的余热资源协同处置生物质能，可以为生物质能利用过程的物料干燥、预处理，生物质热解、活化等提供能源动力，可大大降低生物质能转化利用成本，为生物质能的大规模工业化生产提供便利，制备出高附加值的产品，还可使钢厂余热资源得到充分利用，促进余热利用价值提升，实现能源的高效率利用，减少温室气体效应和降低有害气体的排放，如图 23 所示。

宝钢开展钢厂余热用于协同制备有机废弃物并实现碳汇的研究，内容包括：
1) 低温烟气余热用于干燥，一般在低于 150°C 是生物质热解炭化的干燥阶段，通过风机将钢厂放散的低温烟气引入到炭化反应器内，生物质物料在炭化反应器内吸收热量干燥，水分蒸发逸出再随烟气放散，可提升低温烟气的价值；
2) 高温烟气用于热解炭化：生物质一般在 $300\sim 600^\circ\text{C}$ 发生炭化，通过合适的工艺设计，将一定温度的高温废烟气引入到炭化反应器内，使生物质热解炭化，产生一

部分生物质炭、木醋液和木焦油，还有一部分热解气；3）热解过程中产生的气体主要为 CO 、 H_2 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等，热解产生的气体热值为 $16\sim 17 \text{ MJ/m}^3$ ，还原组分占 60%，可返回钢铁生产流程中利用，也可用作生物质燃气。

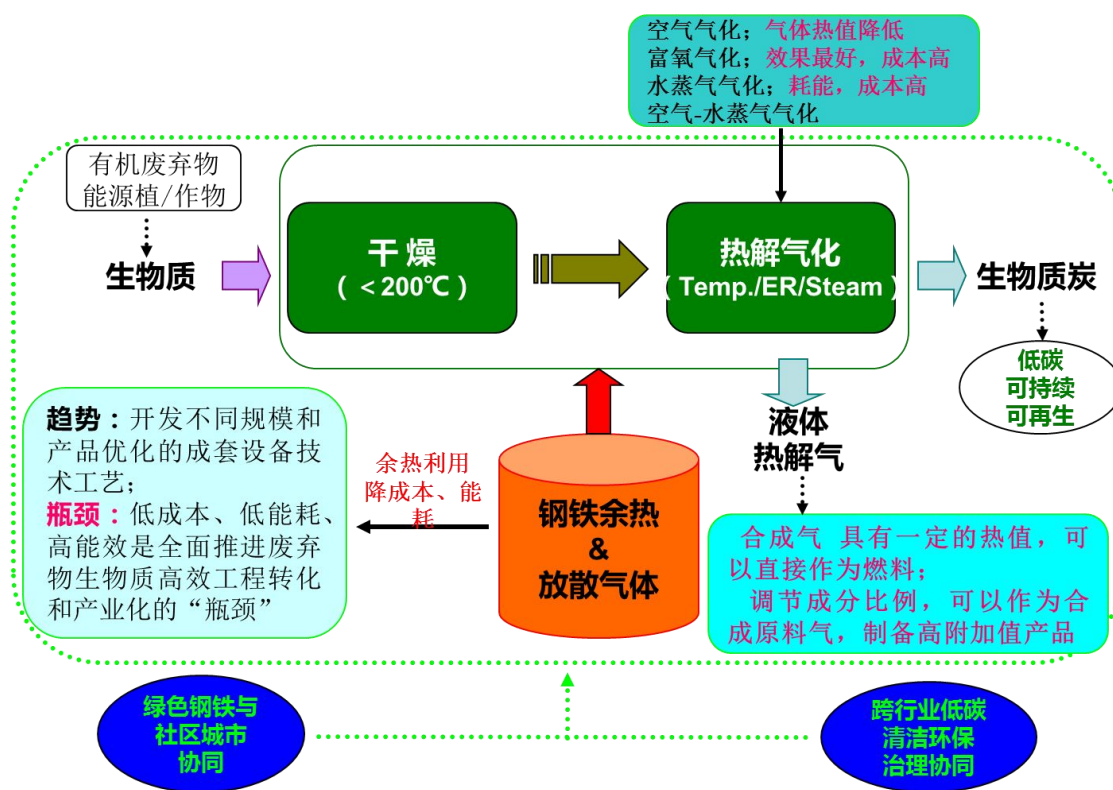


图 23 钢铁余热用于协同制备生物质能

宝钢厂区每年园林废物产生量约 4000 吨，生活污水 2000 吨，将其通过热化学转化的方式制备成生物质能加以利用，可实现有机固废“零出厂”。同时，作为负责任的国有大型企业，宝钢还为社会承担废弃物处置的责任，利用余热和资源综合利用特色可为上海市水葫芦治理（上海市水葫芦每年约产生量约 40 万吨，包含至少 4 万吨干物质）提供解决方案，将水葫芦残余物与园林垃圾一起热解，可以获得炭，作为燃料系统内部利用；或者用作土壤改良剂或者炭基肥料。

4 总结

针对全球碳减排大形势以及中国政府加大钢铁业用能总量控制和碳排放总量控制力度，宝钢股份作为钢铁材料供应商，首先为用户提供绿色可循环利用的材料及其绿色低碳解决方案，为用户创造价值的同时，也为用户提供绿色服务。宝钢股份严格履行社会责任，高起点应用高能效技术并坚持自主开发绿色低碳技术，一方面开展全流程极限能效研究，为工序高能效提供理论极限和技术极限标杆，另一方面通过 BAT 应用、国际领先低碳高能效突破性技术应用、自主开发低碳高能效突破性技术来提升全流程能效，进而实现绿色低碳。此外，宝钢结合国内外技术发展和自身特点，提出有别于 ULCOS 与 COURSE50 且被 World Steel 命名为 Bao-CCU 的技术方案，碳捕获采用成熟的模块化技术以及钢铁厂低品质余热资源作为碳捕获的驱动力，具有较大的降低捕获成本的潜力； CO_2 利用则依托钢厂特有的冶金高温反应器的能源转换功能及工艺需要用于转炉炼

钢，以及钢铁生产过程氮氧能介不平衡用于替代部分氮气，实现 CO₂ 资源化利用与多重价值创造，可为 CO₂ 的持续减排从技术角度提供经济方案。除了直接的碳捕获与利用技术之外，宝钢股份还研究钢厂余热协同处置生物质能以实现生物质能冶金流程能源化以及生产生物质炭，生物质炭可用于碳汇。

钢铁行业碳排放是世界上碳排放总量的重要组成部分，单一技术的应用难以短期内快速降低碳排放总量。因此，不仅需要钢铁厂内部，不同技术的综合应用，也需要同社会上不同的行业合作与协同，共同进行减排和固碳，才能为气候变化的改善做出最大的贡献。联合国气候框架公约是迄今全球最为一致的行动，IPCC、IEA 以及许多其它国际专业机构研究认为，没有 CCS，全球气候变化目标就无法实现。在实际研究及项目执行过程中，不少机构和企业 CCS 的基础上提出了 CCUS。随着不同行业的不断努力和实践，CCUS 逐渐成为国际社会的共识和行动，对我国低碳发展具有越来越重要的战略指导意义，在钢铁行业也得到了前所未有的重视与关注。

参考文献

- [1] 殷瑞钰. 冶金流程工程学[M]. 冶金工业出版社, 2009.
- [2] 中国金属学会, 中国钢铁工业协会. 2011-2020 年中国钢铁工业科学与技术发展指南[M]. 冶金工业出版社, 2012.
- [3] 钢铁工业调整升级规划(2016-2020 年)[J]. 中国钢铁业, 2016(12).
- [4] 王兴艳, 李丹. 中国钢铁工业发展形势展望[J]. 冶金经济与管理, 2016(1):8-11.
- [5] 《中国钢铁工业发展报告(2016 版)》.中国钢铁工业协会.
- [6] 赵羚杰. 中国钢铁行业大气污染物排放清单及减排成本研究[D]. 2016.
- [7] 张春霞, 王海风, 张寿荣,等. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策[J]. 钢铁, 2015, 50(10):1-7.
- [8] 刘文超. 我国钢铁工业能耗剖析及最小能耗研究[D]. 东北大学, 2013.
- [9] 张广宁. 着力推进结构性改革 努力促进钢铁行业提质增效转型升级——在中国钢铁工业协会 2016 年理事(扩大)会议上的报告[J]. 中国废钢铁, 2016(2):8-15.
- [10] 屈超, 陈甜. 中国 2030 年碳排放强度减排潜力测算[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(7):62-69.
- [11] 严珺洁. 超低二氧化碳排放炼钢项目的进展与未来[J]. 中国冶金, 2017, 27(2):6-11.
- [12] 闫云凤. 全球碳交易市场对中国经济-能源-气候系统的影响评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(1):32-39.
- [13] 杨婷. 国外钢铁工业低碳技术发展与我国减排 CO₂ 策略[J]. 中国钢铁业, 2011(6):12-16.
- [14] 张翠菊. 中国碳排放强度影响因素、收敛性及溢出性研究[D]. 重庆大学, 2016.
- [15] 黄静娉. 我国钢铁产业的机遇与挑战[J]. 财讯, 2017.
- [16] 刘鸿杰. 环境约束下钢铁行业全要素能源效率及影响因素研究[D]. 华北电力大学, 2014.
- [17] Bosseboeuf D, Chateau B, Lapillonne B. Cross-country comparison on energy efficiency indicators: the on-going European effort towards a common methodology[J]. Energy Policy, 2007, 25(7-9):673-682.
- [18] 吴利梅. 钢铁企业能源效率及其评价研究[D]. 河北工业大学, 2012.
- [19] Philipsen G, Blok K, Worrell E. International comparisons of energy efficiency Methodologies for the manufacturing industry[J]. Energy Policy, 1997, 25(7):715-725.
- [20] Jin-Li Hu, Shih-Chuan Wang. Total-factor energy efficiency of regions in China[J]. Energy Policy, 2005, 34(17).
- [21] Ray S C, Kim H J. Cost efficiency in the US steel industry: A nonparametric analysis using data envelopment analysis[J]. European Journal of Operational Research, 2007, 80(3):654-671.
- [22] Worrell E, Price L, Martin N. Energy efficiency and carbon dioxide emissions reduction opportunities in the US iron and steel sector[J]. Energy, 2001, 26(5):513-536.
- [23] Kim J W, Lee J Y, Kim J Y, et al. Sources of productive efficiency: International comparison of iron and steel firms[J]. Resources Policy, 2006, 31(4):239-246.
- [24] 王启东. 后《京都议定书》时代中国减排国际义务研究[D]. 暨南大学, 2010.
- [25] 耿涌, 董会娟, 郝凤明,等. 应对气候变化的碳足迹研究综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(10):6-12.
- [26] 李士琦, 郁健, 侯明山,等. 清洁能源冶金的技术分析[J]. 中国冶金, 2012, 22(7):7-9.

- [27] Meijer K, Denys M, Lasar J, et al. ULCOS: ultra-low CO₂ steelmaking[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009, 36(4):249-251.
- [28] 魏侦凯, 郭瑞, 谢全安. 日本环保炼铁工艺 COURSE50 新技术[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2018(3).
- [29] Nishioka K, Ujisawa Y, Tonomura S, et al. Sustainable Aspects of CO₂ Ultimate Reduction in the Steelmaking Process (COURSE50 Project), Part 1: Hydrogen Reduction in the Blast Furnace[J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2016, 2(3):1-9.
- [30] 胡俊鸽, 郭艳玲, 周文涛,等. 美国低碳炼铁新技术的进展及应用前景分析[J]. 冶金管理, 2011(2):51-53.
- [31] 国务院 《“十三五”国家战略性新兴产业发展规划》
- [32] 张福明. 面向未来的低碳绿色高炉炼铁技术发展方向[J]. 炼铁, 2016(1):1-6.
- [33] Global Carbon Atlas. <http://www.globalcarbonatlas.org/en/content/welcome-carbon-atlas>.
- [34] 中国碳排放交易网. <http://www.tanpaifang.com/tanjiaoyi/2017/1010/60669.html>.
- [35] Worldsteel. <https://www.worldsteel.org/>
- [36] 中国钢铁工业协会. <http://www.chinaisa.org.cn/gxportal/login.jsp>.
- [37] 宝钢股份可持续发展报告. <http://bg.baosteel.com/contents/3390/43600.html>