

高炉炼铁技术的过去、现在和未来

张福明

首钢集团有限公司
2023年3月30日



主要内容

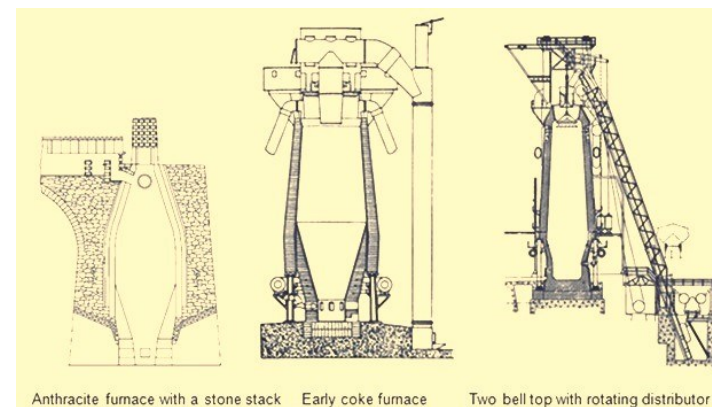
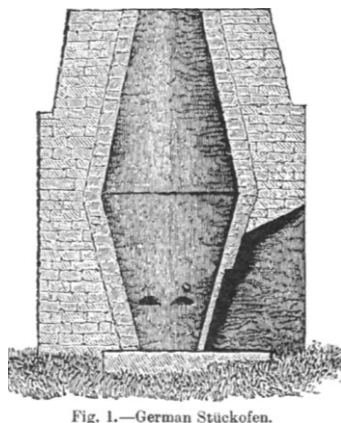
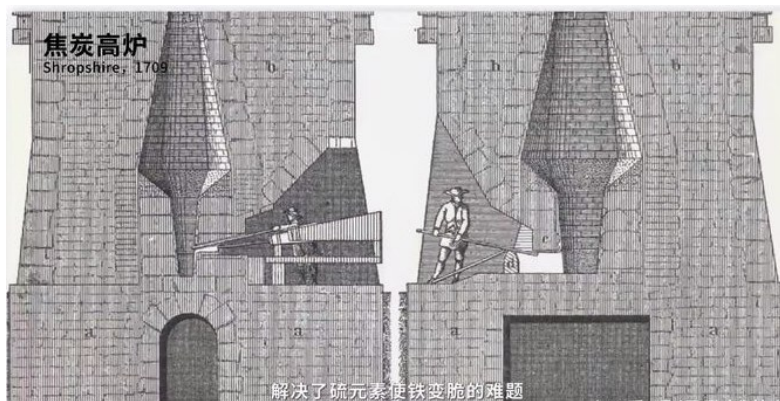
1. 现代炼铁技术演进历程
2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状
3. 当代高炉炼铁技术发展现状
4. 双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新
5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来
6. 结语

1. 现代炼铁技术演进历程

- 我国钢铁工业碳排放量约占碳排放总量的15%，是制造业中碳排放量最高的行业。面对日益严峻的生态环境保护形势，钢铁工业面临着巨大的碳减排压力，迫切需要开发能够显著降低CO₂排放的突破性低碳冶金技术（**近期目标减碳30%以上**），以满足“**碳达峰**”和“**碳中和**”的发展战略要求。
- 我国作为世界上最大的粗钢生产国和消费国，**2021年粗钢产量达到10.33亿t，占全球粗钢产量（19.51亿t）的53%**，2022年粗钢产量达到**10.13亿t**（全球18.78亿t占比54%），**碳排放量占全球钢铁碳排放总量50%以上**，钢铁工业碳减排的重要性和紧迫性刻不容缓。
- 我国目前钢铁制造流程，仍是以**高炉+转炉的传统“长流程”工艺结构占主导地位**。2021年中国高炉生铁产量达到**8.69亿t**，2022年生铁产量**8.64亿t**，占世界65.46%，转炉生产粗钢比率约占90%左右。
- 钢铁制造流程及**能源结构呈现“高碳化”**，煤、焦炭等化石质碳素能源消耗**占能源总量近90%**。

1. 现代炼铁技术演进历程

- 1709年，英国人亚伯拉罕·达比（Abraham Darby, 1676–1717年）发明了焦炭炼铁工艺，使高炉炼铁生产效率显著提高，**使炼铁业开始摆脱对木材的依赖，成为了第一次工业革命（1759–1840年，正是中国乾隆、嘉庆、道光从鼎盛走向衰败的时代）的起源。**
- 从工程演化和工程哲学的视野，回顾300多年前的**焦炭炼铁工艺**的发明，**极大推动了工业文明的人类社会的进步**，具有极其重要的里程碑意义。300多年来，化石质和矿物质能源的大量使用，既推动人类社会从**农耕文明走向了工业时代**，也导致了CO₂的大量排放的肇始。
- 焦炭炼铁的成功只是英国炼铁业革命的起点。到**1776年**，在英国出现了将瓦特蒸汽机用于鼓风的方法，**蒸汽机开始代替了水力鼓风在高炉炼铁中得到应用。**
- 从此以后，**炼铁业不仅摆脱了对木材的依赖，也摆脱了对水力的依赖，从而获得了巨大的技术进步和充分的发展空间。**



科学肇始与技术创新

- 14-16世纪（中国元明两代），欧洲爆发了以追求思想解放的文化运动——文艺复兴（Renaissance）。倡导人文主义精神也就是今天的“以人为本”的思想渊源，在文化、哲学、思想和观念创新的同时，为科学的诞生和技术的发展，奠定了思想文化基础。
- 英国人艾萨克·牛顿（1643~1727），在1687年（中国清朝康熙26年）发表《自然哲学的数学原理》等论文，提出了万有引力和三大运动定律，奠定了现代科学的基础，被誉为科学的肇始。
- 科学肇始使人们从神学统治的禁锢中挣脱出来，开始探索自然世界的规律和法则，从科学实验、理论推导、横断分析、定量研究中，研究宇宙、探索未来。
- 从技艺走向技术，从单纯的手口相传和默会知识传承，迈向了工艺技术创新和机械化革命。



伽利雷（1564~1642）



笛卡尔（1596~1650）



惠更斯（1629~1695）



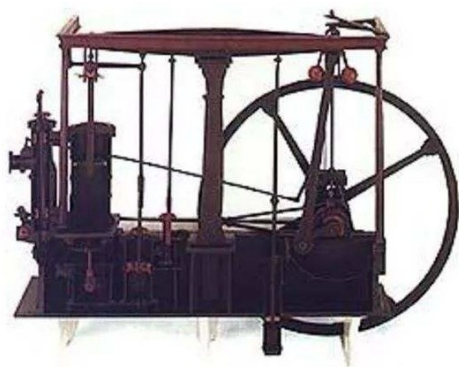
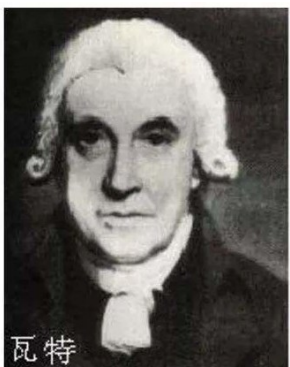
牛顿（1643~1727）



莱布尼茨（1646~1716）

钢铁是工业革命的基础产业

- 现代钢铁冶金是人类社会进步不可或缺的重要支撑。18世纪中下叶至19世纪中叶（1759~1840年）的第一次工业革命，以英国为代表，开启了将热能通过蒸汽机转化为机械能的机器化工业生产，随后以机器生产为标志的工业革命浪潮席卷欧洲、北美乃至全球。1828年英国人尼尔森（J.B.Nelson）发明管式热风炉，1857年英国人考贝 E.A.Cowper 发明蓄热式热风炉；1856年英国工程师贝塞麦发明了转炉炼钢工艺。
- 19世纪以来，随着电力技术的发明和应用，以电力能源技术、无线电通讯技术为核心的第二次工业革命迅速爆发，电力作为全新的二次能源被广泛地应用到工业生产中，内燃机得到了普遍应用，人类的交通工具从马车、火车、轮船，跃进到汽车、飞机时代。
- 20世纪中叶，电子信息技术的发展突飞猛进，电子计算机技术、集成电路以及信息网络的相继问世，使人类社会步入了崭新的时代。毋庸置疑，工业化颠覆了人类传统的生产和生活方式，极大推动了人类文明的快速发展。



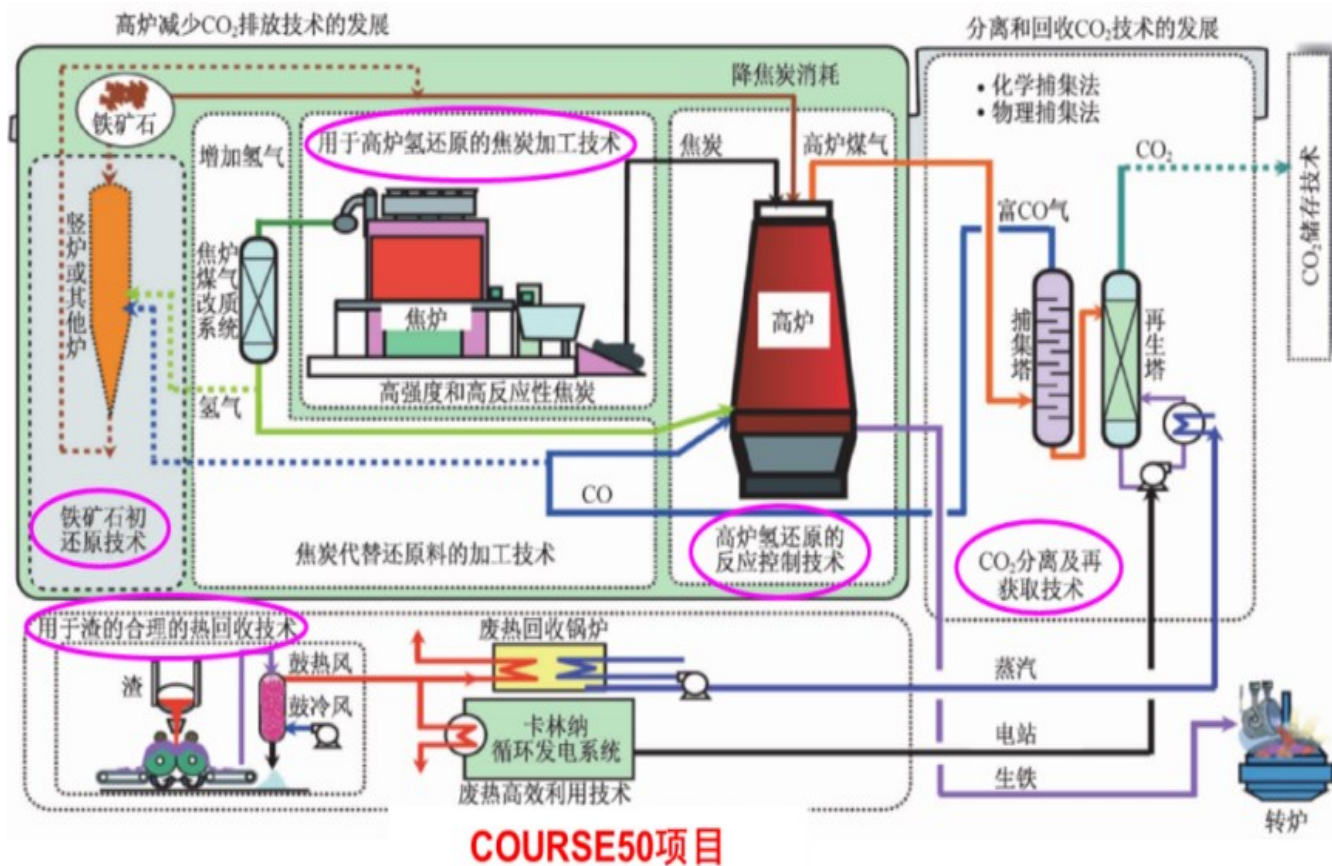
2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状



首钢集团
SHOUGANG GROUP

2.1 日本COURSE50 项目

- COURSE50项目是由日本钢铁联盟发起的突破性炼铁工艺技术。通过利用天然铁矿石，采用**高炉炼铁工艺**实现CO₂大幅度减排的新技术研发项目
- COURSE50项目旨在开发**减少高炉炼铁工艺CO₂排放**，包括从**高炉煤气**中分离和回收CO₂的新型高炉炼铁工艺技术，最终减少约30%的CO₂排放量



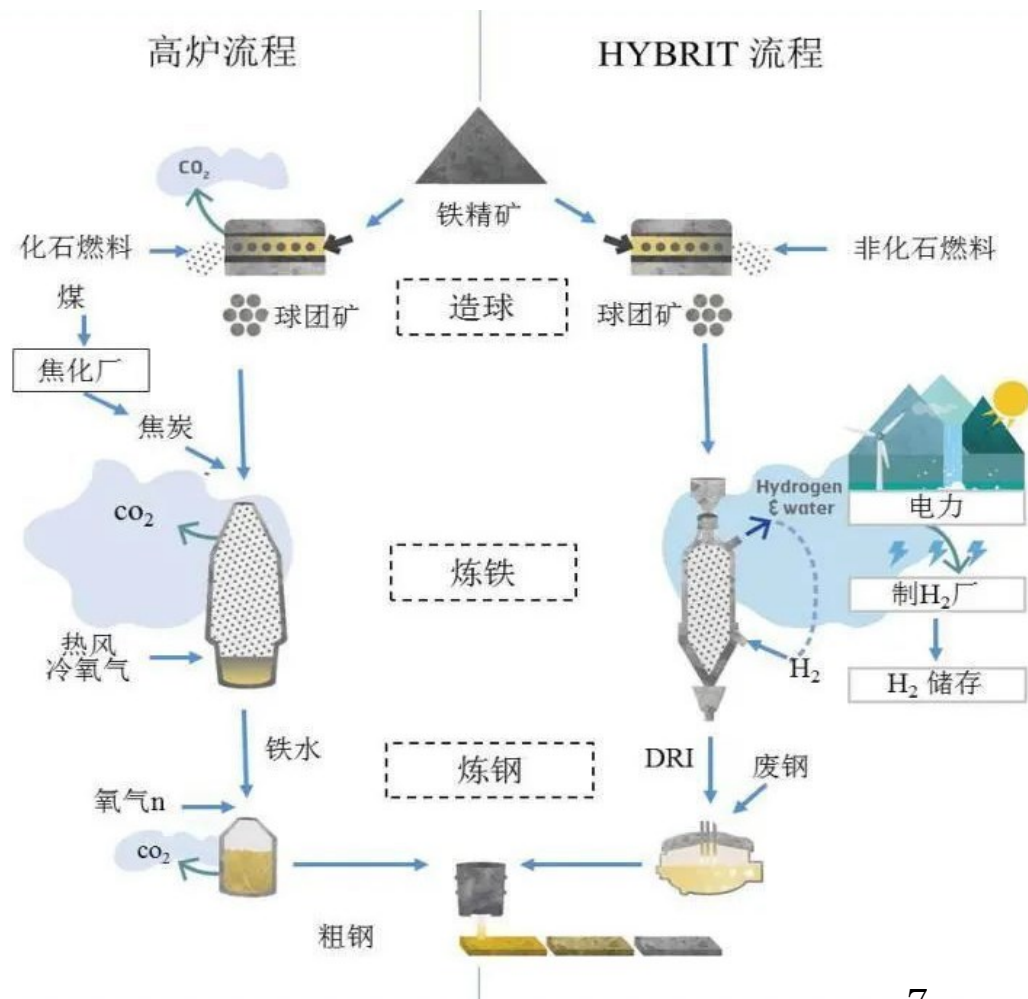
2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状



首钢集团
SHOUGANG GROUP

2.2 瑞典钢铁公司的“突破性氢能炼铁技术”（HYBRIT）

- 目标：使用非化石质燃料所生产的电力和氢气替代炼焦煤等传统工艺，以实现无化石能源的炼钢技术。
- 采用电解水产生氢气，利用氢气生产直接还原铁（DRI），然后将DRI与废钢等一起用于炼钢生产。
- 建造无化石燃料的球团生产线，采用生物质燃料替代化石燃料，以实现基于无化石燃料工艺的铁矿石球团矿制造技术。



2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状



首钢集团
SHOUGANG GROUP

2.3 高炉喷吹富氢还原气体

(1) 德国蒂森克虏伯高炉喷吹氢气试验项目

蒂森克虏伯采用传统高炉炼铁工艺，其焦比、煤比和燃料比分别约为300kg/t、200kg/t和500kg/t，其高炉喷煤技术在近30年来一直处于领先水平。蒂森克虏伯认为以氢能的利用是实现本世纪中期碳中和战略目标的关键。

长期目标
2050

实现“碳中和”

中期目标
2030

生产和能源供应系统的CO₂排放量比2018年减少30%；客户的CO₂排放量比2017年减少16%

短期目标
2022

北莱茵-威斯特法伦州全部3个高炉喷吹氢气，预计可减少20%的CO₂排放

2019

杜伊斯堡厂9号高炉在1个风口上喷吹氢气代替煤粉



2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状



(2) 安赛洛米塔尔纯氢炼铁技术研发

- 安米汉堡厂目前采用天然气生产直接还原铁，计划未来几年，在汉堡厂进行利用氢直接还原铁矿石的工艺试验。该研究项目的氢气制备将采用变压吸附工艺，冶金煤气中分离氢气，使其纯度达到95%以上，待未来有足够数量绿氢时，将采用绿氢生产直接还原铁。
- 安米在德国不莱梅厂的研究项目是通过电解槽制备氢气，并将氢气喷入高炉风口。
- 安米在法国敦刻尔克厂，正在开发将钢铁生产过程中产生的副产煤气转化成合成气体喷入高炉的工艺，包括向高炉喷吹直接还原副产煤气技术，以及向高炉风口喷吹合成气体技术。
- 安米阿斯图里亚斯厂拥有先进的焦炉煤气处理工艺，可以向高炉喷吹灰氢，即从天然气和焦炉煤气中提取氢气，该项目将于2021年启动。

2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状

(3) 德国迪林根和萨尔钢公司富氢炼铁技术

- 德国迪林根 (Dillinger) 和萨尔钢铁公司 (Saarstahl) 从2020年开始, 用于研究将钢铁厂的**富氢焦炉煤气**, 在**萨尔钢铁公司的2座高炉上喷吹**, 从而实现利用氢气替代部分碳素燃料的工艺技术。
- 2020年8月, 迪林根 (Dillinger) 钢铁公司发布, 该厂建成并投产了德国首家在高炉常规运行中, 使用**氢气作为还原剂的氢基钢铁生产厂**, 钢铁生产新工艺由Dillinger和Saarstahl钢铁公司共同开发和投资。该工艺通过向高炉中喷吹**富氢焦炉煤气**, 进一步减少CO₂排放, 未来计划在2座高炉上**喷吹纯氢**。



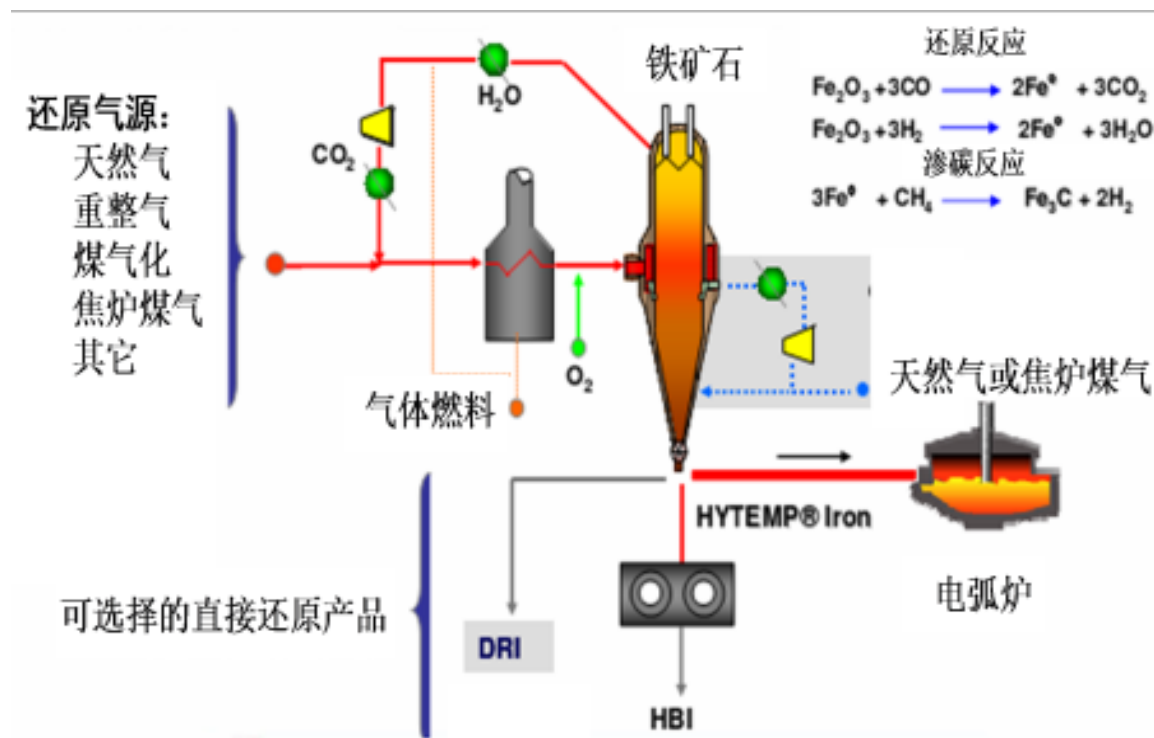
2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状

2.4 氢能竖炉直接还原技术

(1) 安米氢基DRI-EAF工艺流程

(1) 安米欧洲公司在汉堡厂拥有欧洲唯一的**直接还原-电炉 (DRI-EAF) 工艺装置**，计划在汉堡厂进行**氢还原铁矿石生产直接还原铁 (DRI)**的工业化规模试验，以及**电炉炼钢流程使用无渗碳DRI**进行工业试验。

(2) 安米法国敦刻尔克厂已经启动一项研究工作，建造一座大型**DRI工厂并配置EAF**，目前考虑将**全部使用氢生产DRI**。

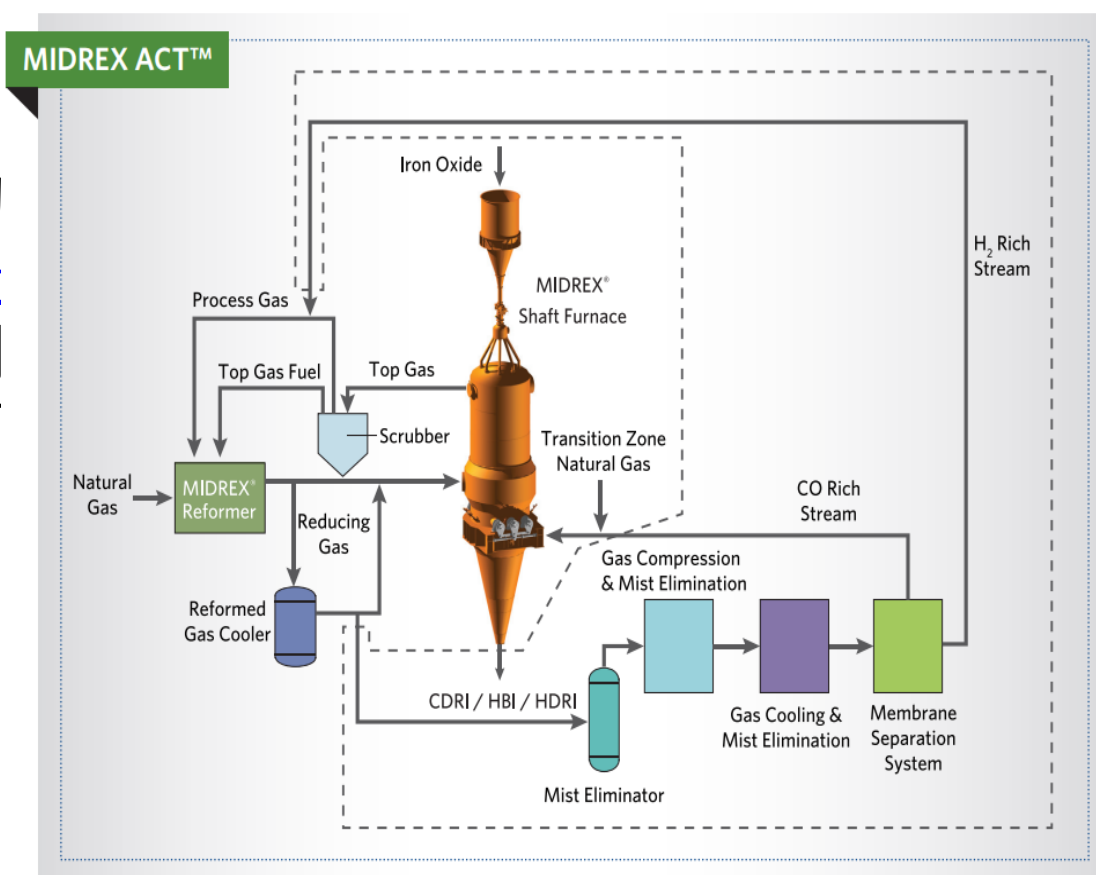


2. 低碳绿色炼铁技术的发展动态和现状

2.4 氢能竖炉直接还原技术

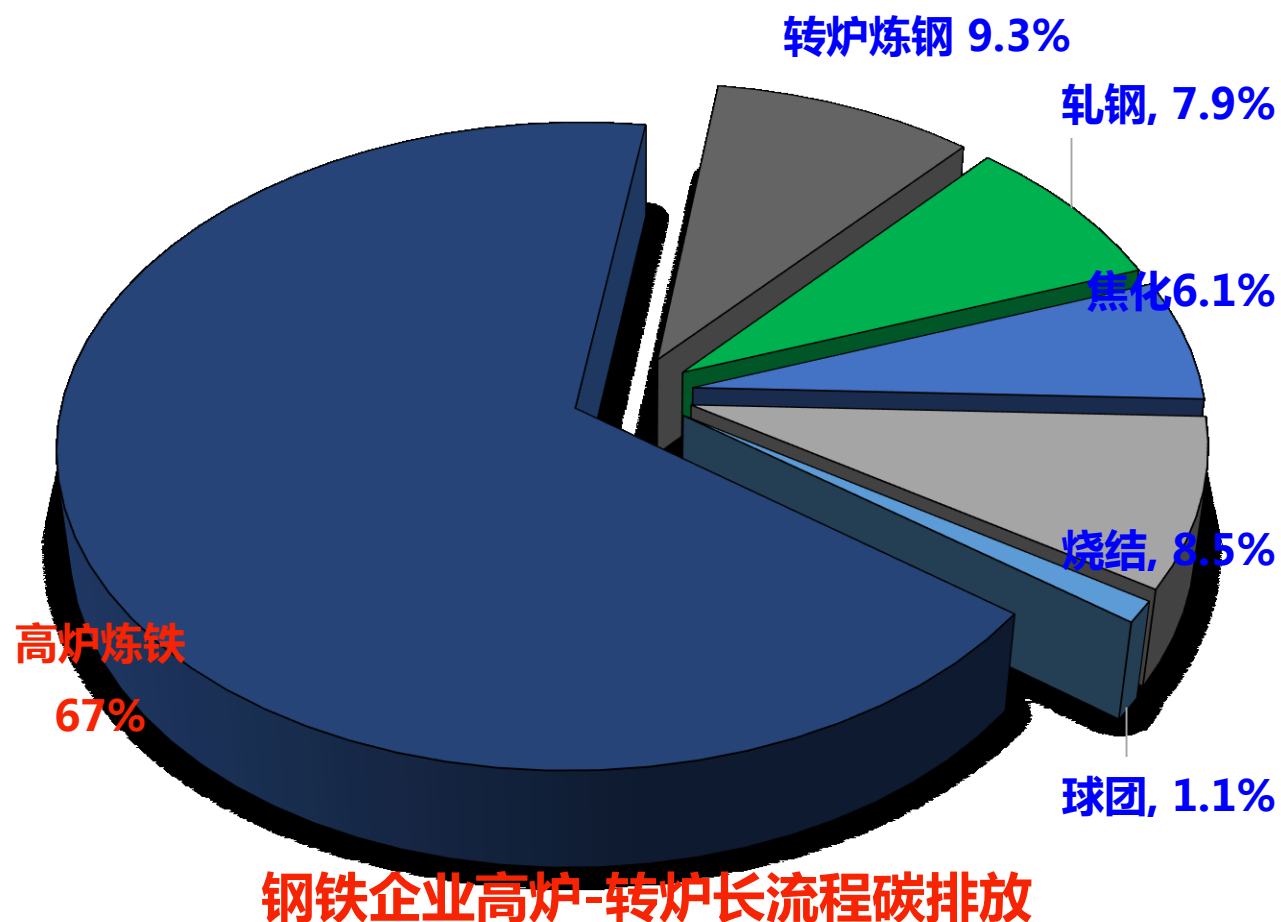
(2) 氢基Midrex工艺

- 神户制钢全资子公司米德雷克斯的Midrex工艺已被证实为CO₂排放量最低的炼铁工艺路线。与电炉配合使用的Midrex工艺吨钢CO₂排放量约为高炉-转炉流程的50%。
- 该公司正在开发一种利用低碳能源制备纯氢气并利用所制氢气生产直接还原铁的技术，被命名为“MIDREX H₂”。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

- 基于碳还原的传统冶金工艺，炼铁是钢铁工业CO₂排放的主要源头和根本。
- 在整个高炉+转炉长流程过程中，炼铁系统（包括焦化、烧结、球团和高炉炼铁工序）碳排放量占钢铁企业长流程总排放量的82.79%，其中高炉炼铁占67%，烧结占8.5%，焦化占6%。
- 钢铁企业短期碳减排工作重点应放在焦化、烧结及高炉炼铁工序上，特别要注重高炉炼铁工序的减排。

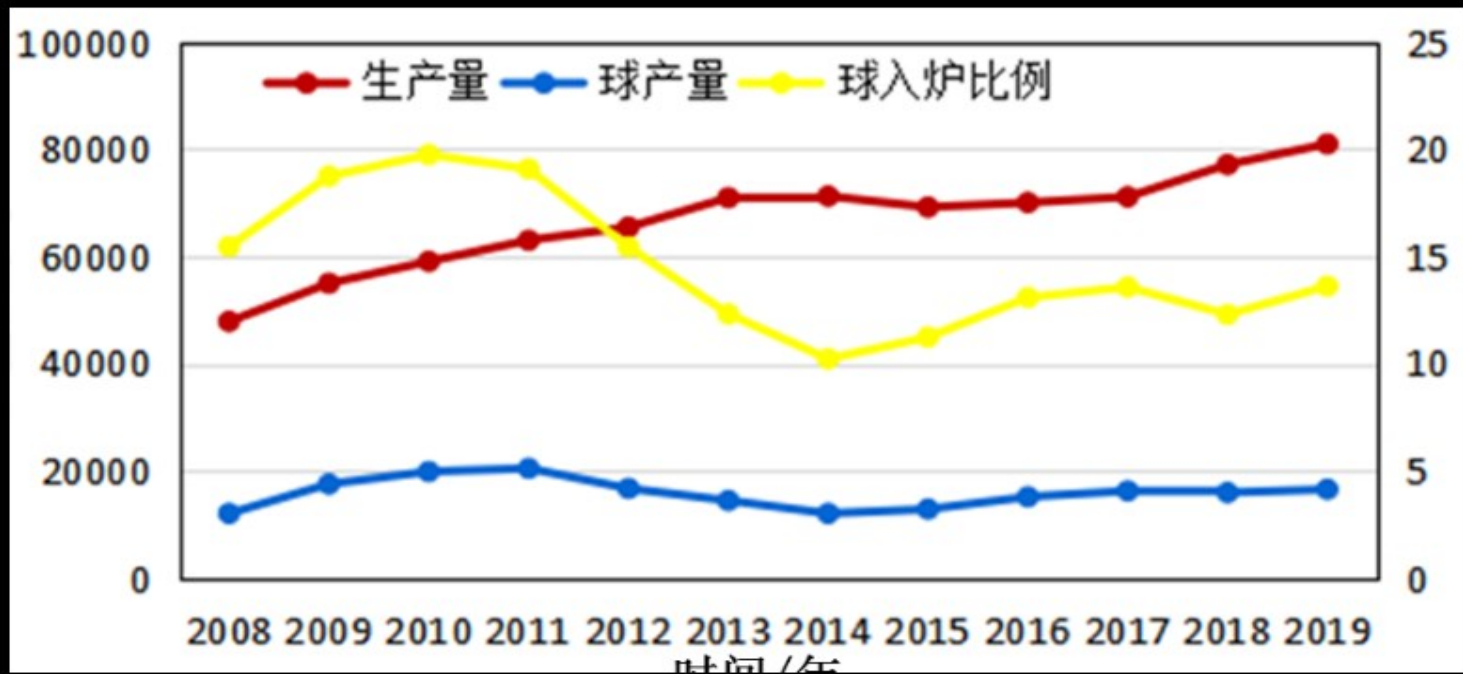




3. 当代高炉炼铁技术发展现状

3.1 优化高炉炉料结构

- 实践表明每吨球团矿比烧结矿在生产过程中可降低CO₂约110kg/t矿；
- 在一定范围内，球团矿入炉比率提高1%，吨钢CO₂排放可降低0.27%~0.3%；
- 根据生产实践数据推算，我国钢铁行业炼铁高炉球团矿的平均入炉比例由15%提高到55%时，吨钢CO₂排放可降低185kg/t。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

3.2 优化高炉操作

(1) 稳定提高风温

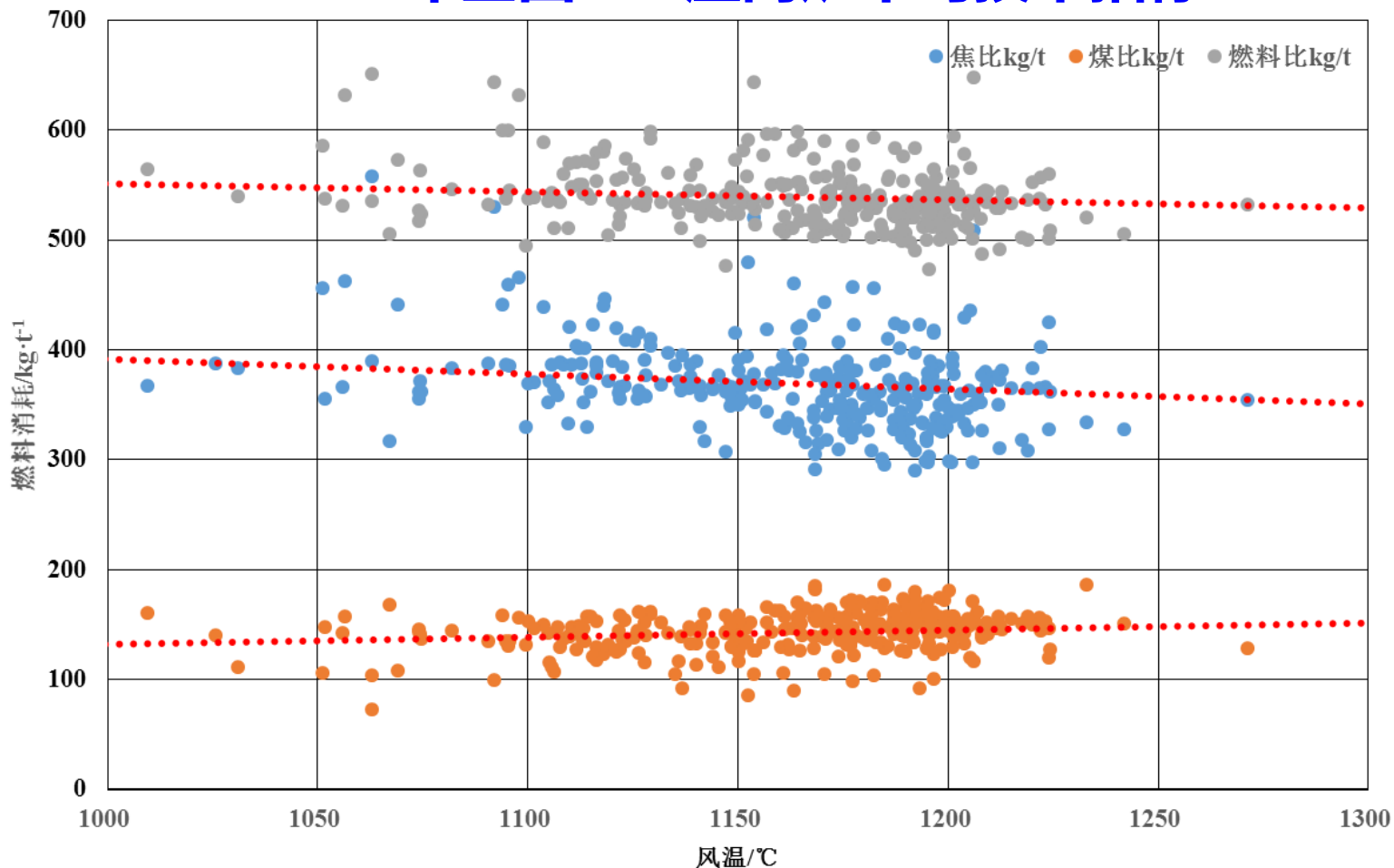
高炉鼓风所带入的物理热从某种意义上讲，是一种“**清洁低碳能源**”，可有效降低**碳素消耗和碳排放**、维持合理的**理论燃烧温度**、为风口喷吹燃料提供**能量基础**和保障。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

- 提高高炉风温，**燃料比**和**焦比**呈降低趋势，**煤比**呈现线性上升趋势。

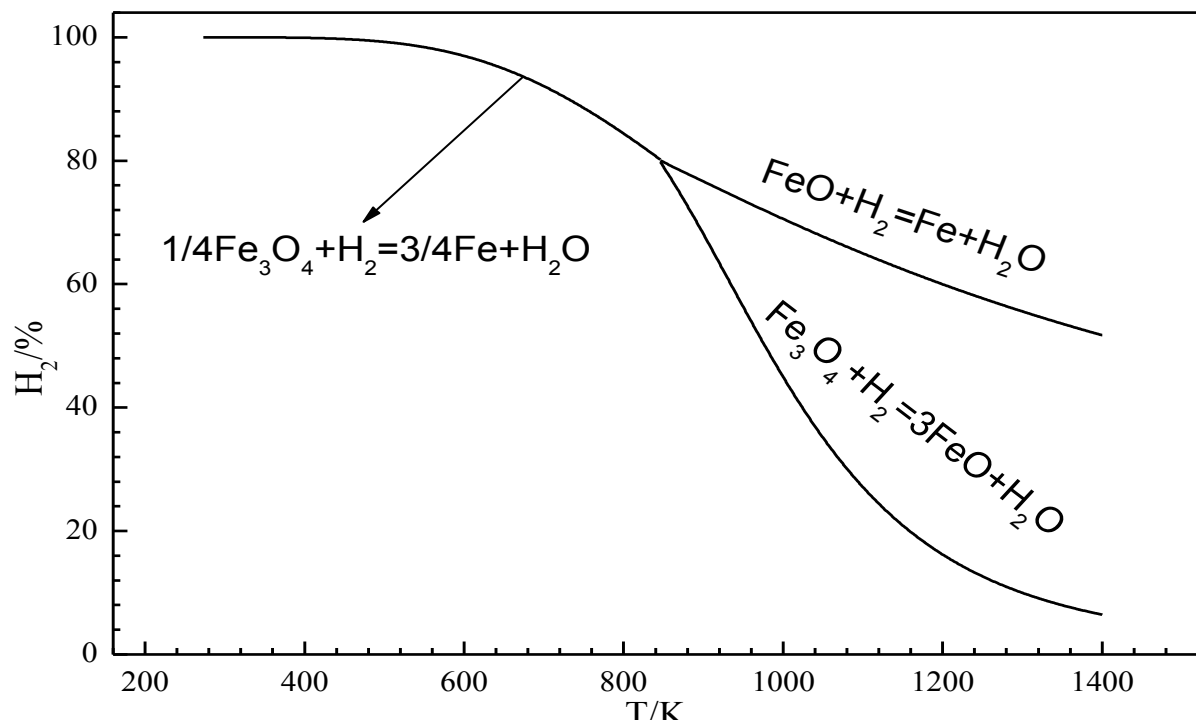
2020年全国310座高炉平均技术指标



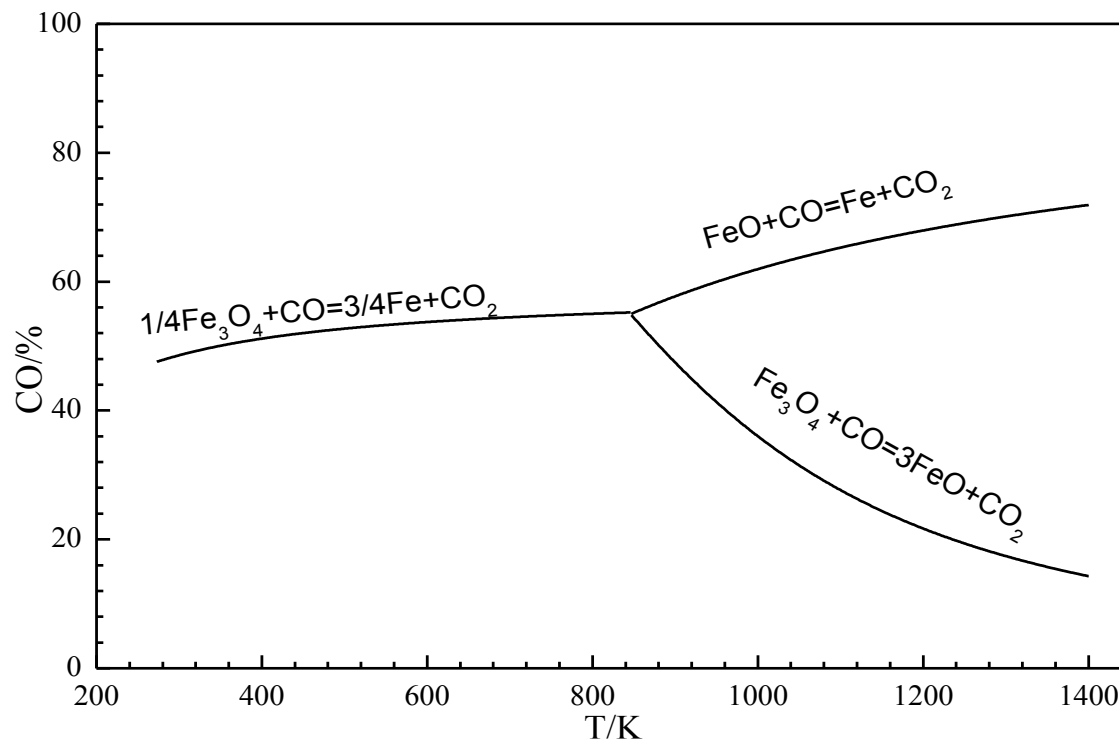
3. 当代高炉炼铁技术发展现状

- 随着风温的提高，有助于提高 H_2 和 CO 的还原势，促进间接还原过程、提高生产效能。
- 高温热风是高炉过程冶金反应的本征基元反应（造气）和能量本源。

H_2 还原氧化铁的平衡图



CO 还原氧化铁的平衡图



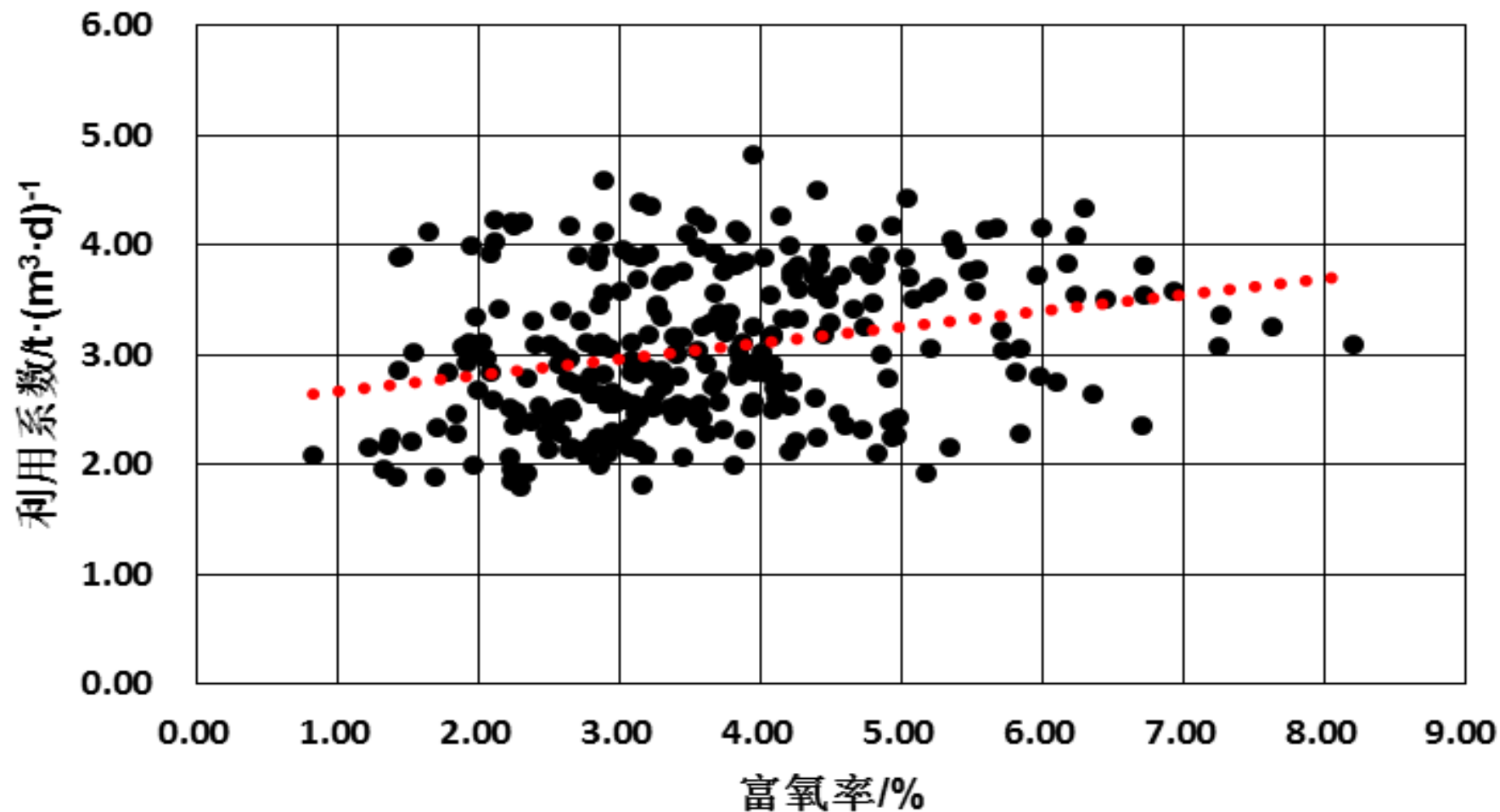
3. 当代高炉炼铁技术发展现状

(2) 改善高炉操作运行

- 高炉透气性是未来高炉超高强度冶炼、超低碳冶炼的最关键的制约环节。随着富氧率的提高，炉腹煤气量降低，有助于提高CO和H₂的还原势，对于改善高炉透气性，促进间接还原过程、提高生产效能都将发挥重要作用，这将成为未来高炉实现低碳冶炼的一个重要途径。
- 采用高富氧-大喷煤和氧-煤强化高炉冶炼将成为主要技术途径之一。
- 电炉流程的逐步推广应用，单座高炉的生产效能还将会进一步提高。高效率、低成本、低碳化生产优质铁水是未来高炉发展的重要特征。
- 高风温与高富氧技术耦合匹配，是未来高炉大量喷吹富氢(氢基)燃料的重要基础。

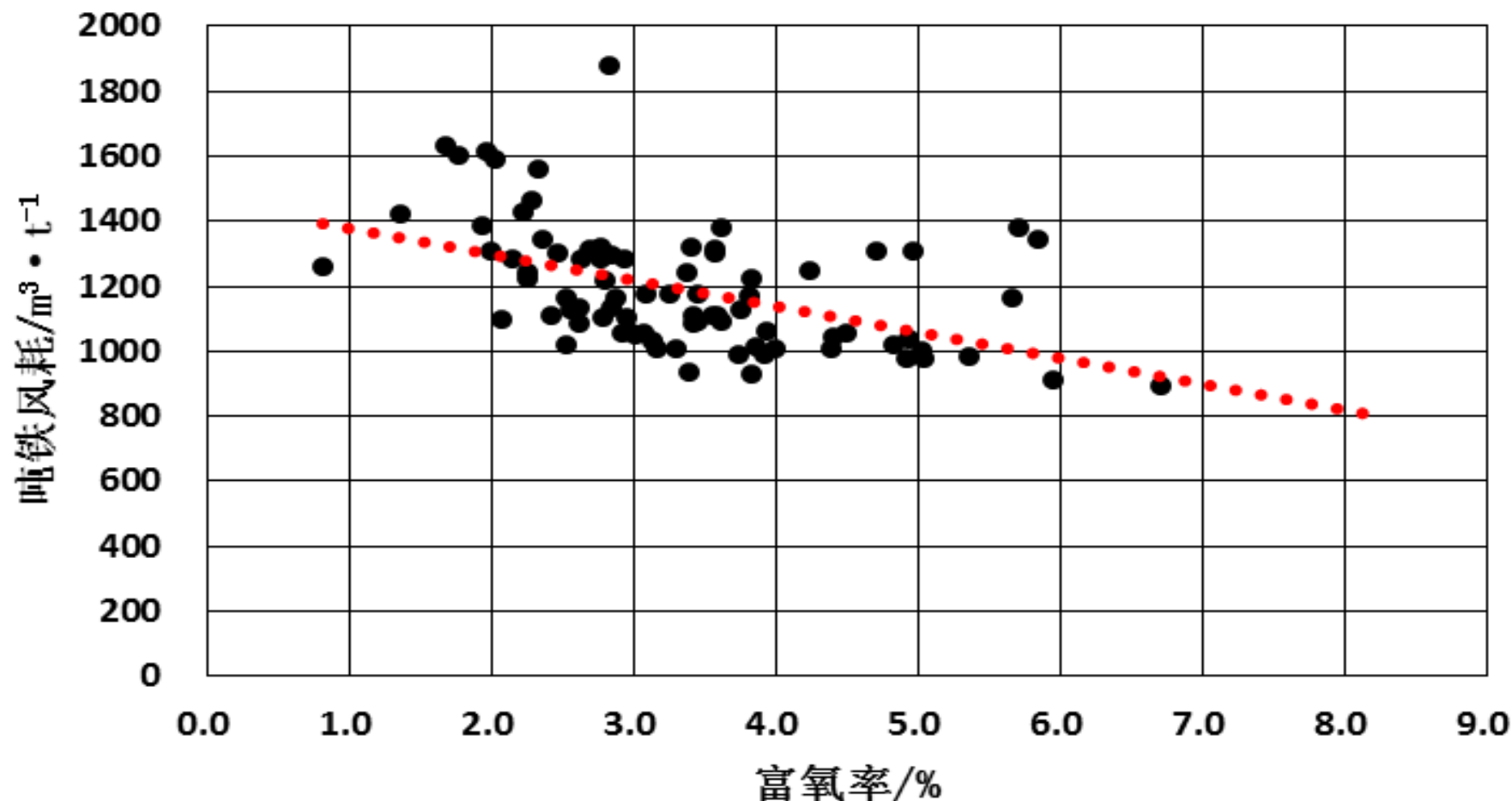
3. 当代高炉炼铁技术发展现状

高富氧率与利用系数的关系



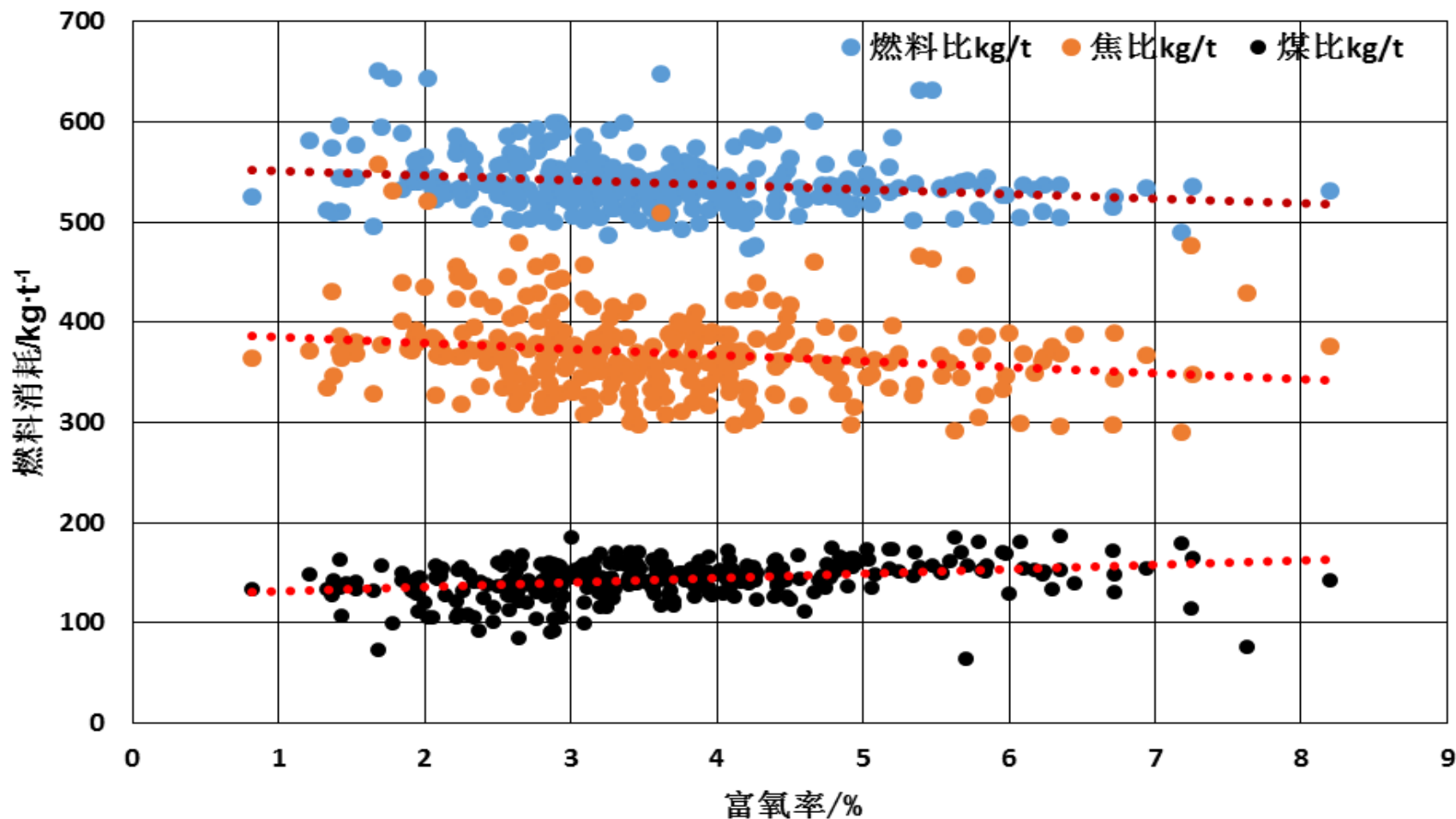
3. 当代高炉炼铁技术发展现状

富氧率与吨铁风耗的关系



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

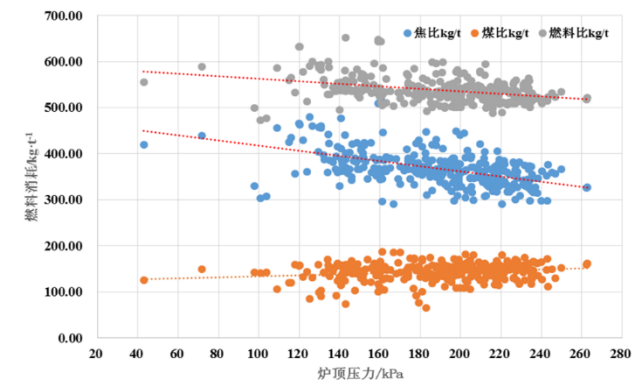
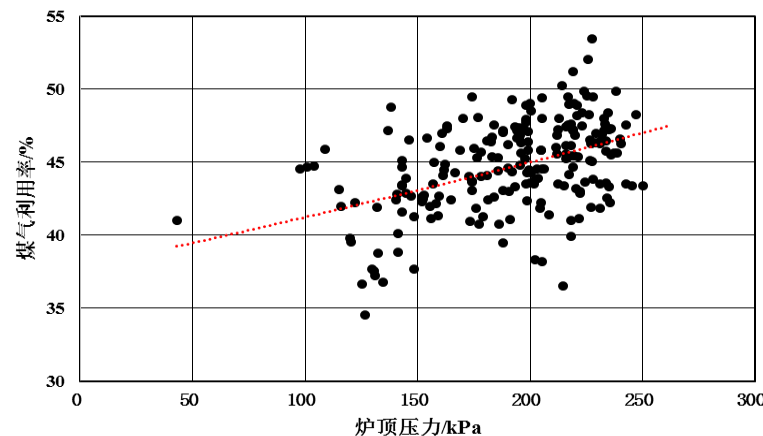
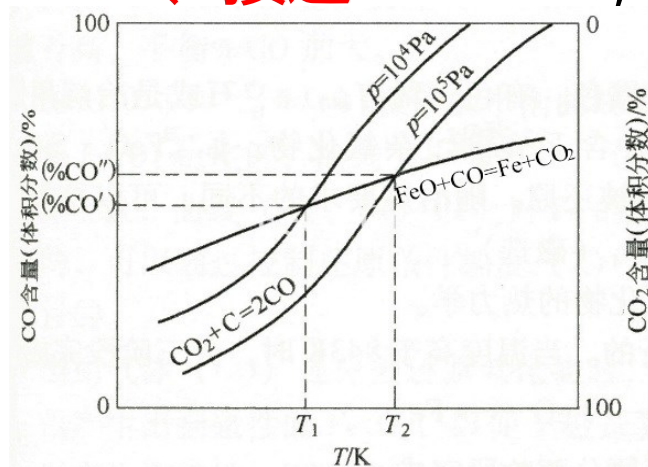
富氧率与燃料消耗的关系



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

(3) 提高炉顶压力

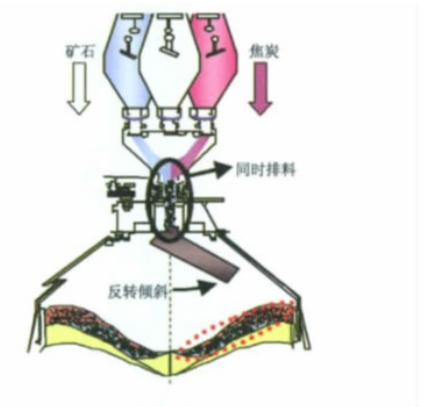
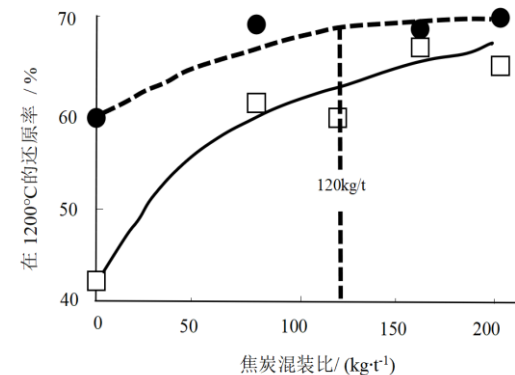
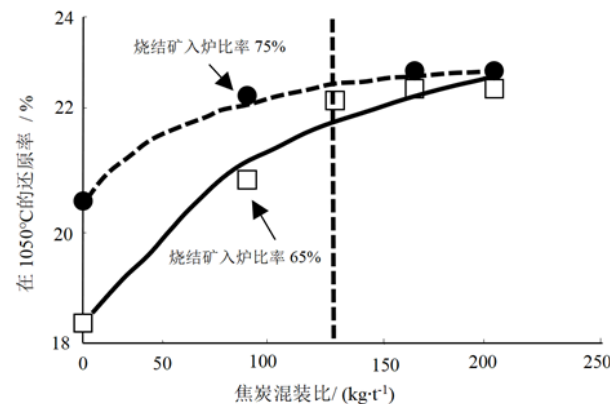
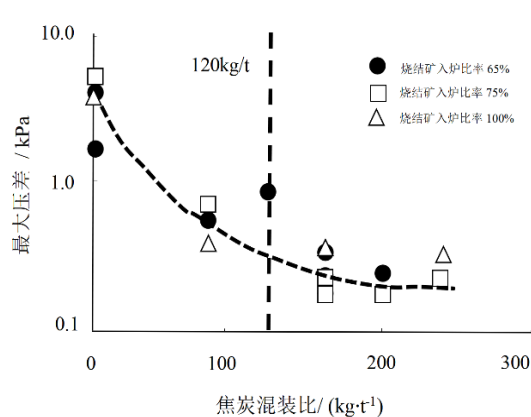
- 提高炉顶压力实质上是压缩了煤气体积、降低了煤气流速、延长了煤气在高炉内的停留时间，进而改善间接还原动力学条件，从而有助于煤气和铁矿石之间的气-固反应，增强了煤气的扩散、穿透能力，强化了煤气吸附、界面反应等还原过程。
- 在宏观上提高顶压可以有效提高高炉透气性，促进高炉稳定顺行。
- 近年来，我国高炉顶压提高幅度较大，一些先进高炉的顶压已经达到280 kPa、接近300 kPa，有效提高了煤气利用率、降低了燃料消耗。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

(4) 高炉矿焦混装技术

- 在矿石料批中烧结矿占65%~100%的条件下，焦炭混装量从120kg/t提高到200kg/t，软熔试验表明高炉最大压差显著下降。
- 烧结矿入炉比率为75%或65%条件下，矿石层混装焦炭后，当焦炭混装比增加到120kg/t时，最大压差显著降低；温度为1050℃和1200℃条件下，矿石还原率显著提高。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

(5) 高比率球团矿冶炼

- 日本神户厂从2001年开始，高炉采用全球团矿冶炼，使用加古川厂生产的自熔性球团矿。使用自熔性白云石球团矿代替块矿，提高了炉料的高温熔滴性能。
- 2016年10月，在神户3号高炉（ 1863m^3 ）进行了高比率球团矿冶炼的工业试验（73%球团矿+27%块矿），在球团矿比率高达80%的条件下，实现了 283kg/t 低焦比操作，燃料比降低到 503kg/t 。
- 神户制钢公司加古川2号高炉（ 4844m^3 ），在神户3号高炉工业试验的基础上，进行了配加70%球团矿操作的试验。

日本神户3号高炉高球团矿冶炼操作指标

时间	2016年4月	2016年10月
利用系数/ $\text{t}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$	1.92	1.99
球团矿入炉比率/%	65	80
烧结矿入炉比率/%	0	0
块矿入炉比率/%	35	20
燃料比/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	513	503
焦比/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	315	283
煤比/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	192	220
热流比	0.81	0.83
富氧率/%	2.8	4.6
煤气利用率/%	51.5	52.9
渣量/ $(\text{kg}\cdot\text{t}^{-1})$	258	257



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

3.3 低碳发展目标与路径

面向未来，以高炉为中心的炼铁系统协同优化和动态有序、协同连续、精准高效运行，是炼铁系统流程结构优化和技术发展的重点。

(1) 在常规高炉使用固体碳素燃料（焦炭+煤粉）的条件下，降低碳素燃料消耗是减少CO₂排放最直接、最有效的技术措施。2030年前后，燃料比520kg/t以下（达标水准）；低于500kg/t（平均先进水平）；480kg/t以下（低碳）；470kg/t甚至更低（超低碳）。

(2) 进一步加强精料技术研究，探索并构建以球团矿为主的新型炉料结构体系，降低整个炼铁流程的碳素消耗和污染物排放，进而降低CO₂排放。



3. 当代高炉炼铁技术发展现状

(3) 继续推进高风温、富氧、喷煤、高顶压等关键技术的再创新，进一步降低高炉燃料消耗，提高煤气利用率，促进高炉稳定顺行，减少CO₂排放。

(4) 加强大型高炉操作规律的研究，建立动态有序、协同连续、精准高效的现代高炉运行理念，以高炉生产长期稳定顺行为基础，不断改善、优化、提升大型高炉的动态精准操控水平。

(5) 进一步加强高炉、热风炉等主体系统运行的过程智能化监测和维护，采取有效技术措施延长高炉寿命，奠定高炉高效耗低排放运行技术装备基础，提高高炉生产效能。

(6) 构建料场、烧结、球团、焦化、高炉炼铁系统一体化集中智能管控平台，着重解决不同工序的界面技术优化，实现物质流、能量流和信息流的高效协同运行，通过炼铁工序全流程智能化动态管控，以高炉为中心构建信息物理系统（CPS）和集成控制中心，提高智能化精准控制水平。

4. 双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新



首钢集团
SHOUGANG GROUP

4.1 烧结过程富氢气体燃料喷吹技术

- 烧结过程在料面喷吹天然气或焦炉煤气，可以有效降低固体燃料消耗，改善料层传热机制，进而还可以降低烟气中CO等有害物质的排放。
- 目前铁前工序的CO₂排放约占全流程的80%，其中每吨烧结矿CO₂排放约为150~170kg/t，降低烧结工序的碳素燃料消耗对降低碳排放意义重大。
- 当前国内不少烧结机正在开展“烧结烟气双循环”和烧结料面喷吹天然气（或焦炉煤气）的技术升级改造。如果烧结实现烟气循环和喷吹天然气技术，每吨烧结矿的CO₂排放可降低约12kg/t。



4. 双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新



首钢集团
SHOUGANG GROUP

4.2 高炉喷吹富氢气体燃料

(1) 理论研究和生产实践表明，通过高炉风口向高炉喷吹天然气，有利于提高高炉产量和降低燃料比。天然气富含甲烷和氢，高炉喷吹以后甲烷在高温条件下经过裂解变成 H_2 和 CO ，可以提高炉腹煤气中 H_2 和 CO 体积百分数，提高高炉煤气还原势。

(2) 以 $5500m^3$ 高炉为例，根据理论计算，喷吹天然气 $30kg/t$ ，高炉预计每年可减排 CO_2 约为 $14.5万t/a$ 。如果喷吹焦炉煤气，由于 H_2 的体积百分数更高（ $>50\%$ ），理论上 CO_2 的减排效果会更加显著。

(3) 有条件的高炉喷吹天然气、焦炉煤气等氢基燃料，是减少碳素燃料消耗和 CO_2 排放的一个新的技术途径。

(4) 在当前技术条件下，“绿氢”的大量制备和使用仍处于研究探索阶段，规模化、商业化的应用还有待时日，与此同时经济性也需要结合碳减排政策制度量力而行、因地制宜、有序平稳推进，不宜一哄而上。

4. 双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新



首钢集团
SHOUGANG GROUP

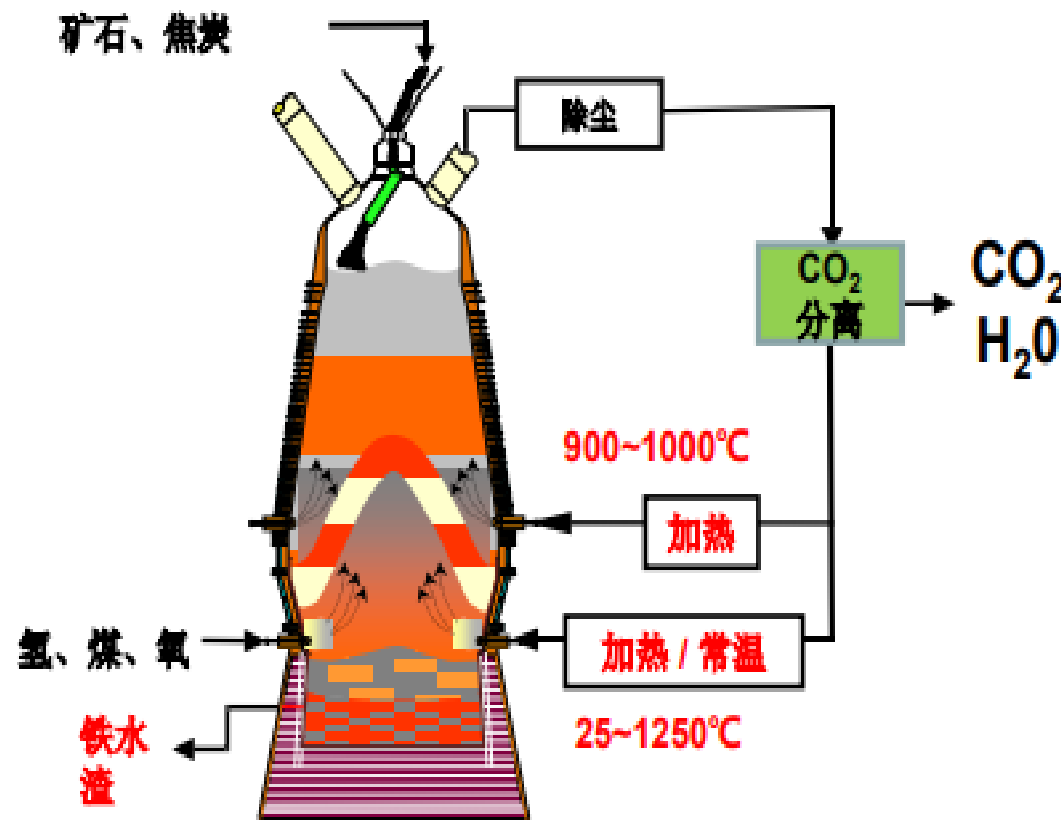
4.3 高炉炉顶煤气循环技术

(1) 高炉炉顶煤气中，CO和H₂的体积分数分别约为20%~28%和1%~6%。传统工艺中一般将高炉煤气作为气体燃料使用，煤气中的CO经过燃烧后，最终生成CO₂排放。

(2) 高炉煤气顶气脱除CO₂（体积分数约为18%~23%）以后，不仅可以实现CO₂的分离捕集（CCS/CCUS），还提高了炉顶煤气的热值。俄罗斯和日本将炉顶煤气脱除CO₂以后再经过风口或炉身喷口喷入高炉，实现顶气的循环再利用。

(3) 高炉炉顶煤气循环利用的加热及喷吹工艺尚需开发研究。

高炉炉顶煤气脱除CO₂循环喷吹工艺流程



4. 双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新

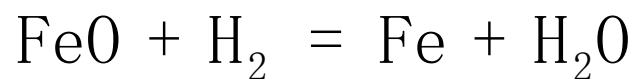


首钢集团
SHOUGANG GROUP

(3) 高炉炉顶煤气脱除CO₂再循环工艺，在气基竖炉直接还原工艺中（如HYL-ZR和Midrex等）已广泛应用。

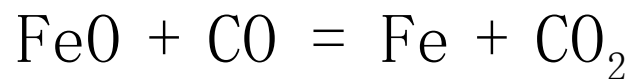
(4) 对于喷吹富氢燃料和高富氧的高炉，由于炉腹煤气量的大幅度降低，风口前理论燃烧温度又不可能大幅度提高，加之H₂还原FeO的过程为吸热反应，因此高炉“三传一反”冶金过程将可能会出现供热不足的情况。

(5) 因此从炉身喷吹炉顶循环煤气，其技术本质就是实现碳-氢耦合冶金，因为CO还原FeO的过程是放热反应，这样就可以把传热、传质和动量传输的“三传过程”，在新的炉料结构和燃料结构条件下，建立起新的动态耗散结构，并实现过程优化，达到铁素物质流、碳素能量流、氢素能量流和热量的动态耦合和协同运行。



$$\Delta H_{298}^{\theta} = 28010 \text{ J/mol}$$

吸热反应



$$\Delta H_{298}^{\theta} = -13190 \text{ J/mol}$$

放热反应

4. “双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新



首钢集团
SHOUGANG GROUP

- 高炉-转炉长流程（BF+BOF）+竖炉-电炉短流程（DRI+EAF）“长短结合”耦合匹配，可以形成长短两种流程的集成优化和动态协同，以长流程为主、以短流程为补充，进一步加大废钢资源的使用比率，降低CO₂排放总量和吨钢排放量。
- 利用焦炉煤气、煤制气、天然气以及绿氢，建设规模适度的DRI直接还原装置，热装热送加入电炉（EAF），再配加一定量的废钢，可以生产以长材或薄规格带材产品，可以有效降低钢铁制造全流程的CO₂排放。

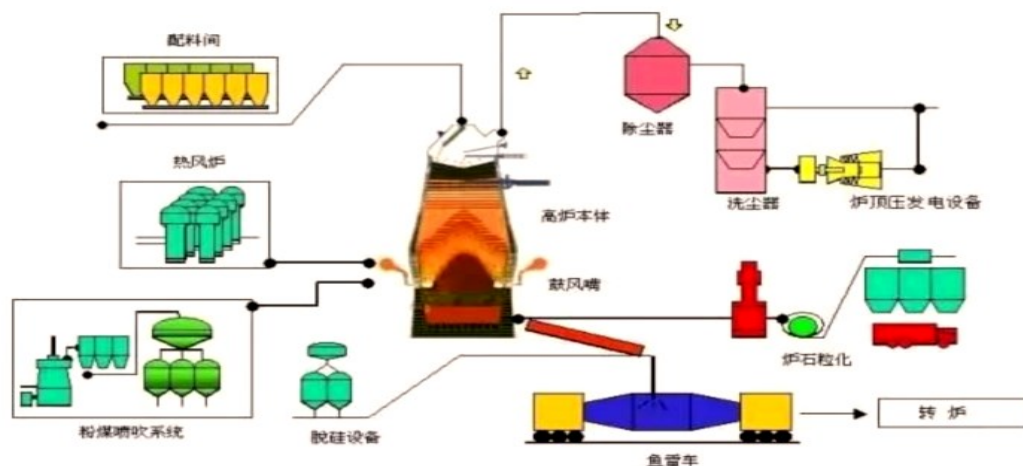


4. “双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新

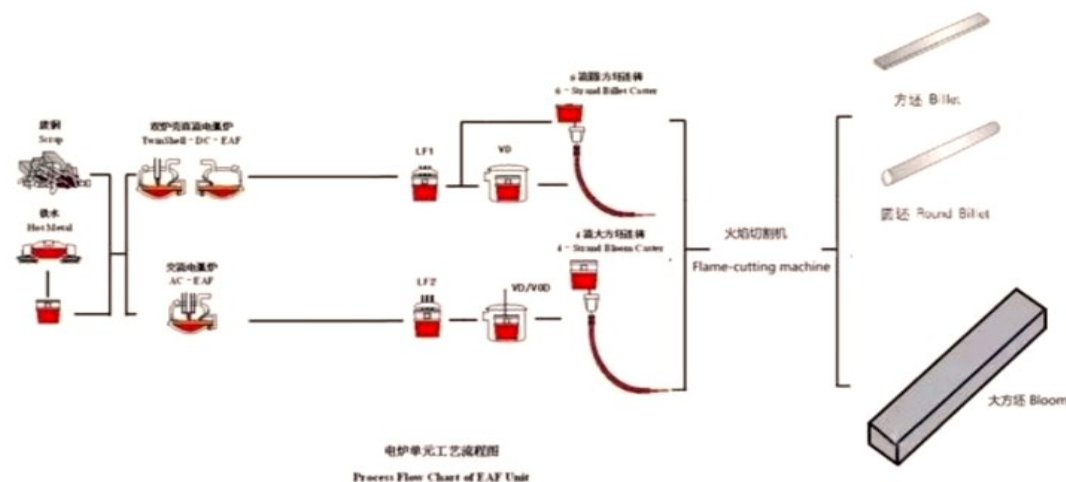


首钢集团
SHOUGANG GROUP

- 高炉-转炉长流程（BF+BOF）+竖炉-电炉短流程（DRI+EAF）“长短结合”耦合匹配，可以形成长短两种流程的集成优化和动态协同，以长流程为主、以短流程为补充，进一步加大废钢资源的使用比率，降低CO₂排放总量和吨钢排放量。
- 利用焦炉煤气、煤制气、天然气以及绿氢，建设规模适度的DRI直接还原装置，热装热送加入电炉（EAF），再配加一定量的废钢，可以生产以长材或薄规格带材产品，可以有效降低钢铁制造全流程的CO₂排放。



高炉-转炉制造流程（长流程）



废钢-电炉制造流程（短流程）

4. “双碳”背景下高炉-转炉冶金工程创新



首钢集团
SHOUGANG GROUP

在已有低碳技术基础上，以首钢京唐3座5500m³高炉为例：

高品质球团 制备

- 球团矿产量为1200万t/a，秘鲁高品位铁矿粉（TFe：69.8%，SiO₂：1.5%），可以制备出**高品质低硅优质球团矿**（品位>65%）；
- 3台504m²带式焙烧机球团生产线具备50万t/a **DRI**的球团制备和供给能力。

竖炉+电炉 (DRI+EAF)

- **气基竖炉(DRI)**替代高炉(BF)，**电炉(EAF)**替代转炉（BOF）；
- 钢铁厂自产富氢焦炉煤气（H₂>50%）具备较为充沛的**天然气和焦炉煤气**资源；
- 配加大宗**废钢**，或采用全废钢冶炼。

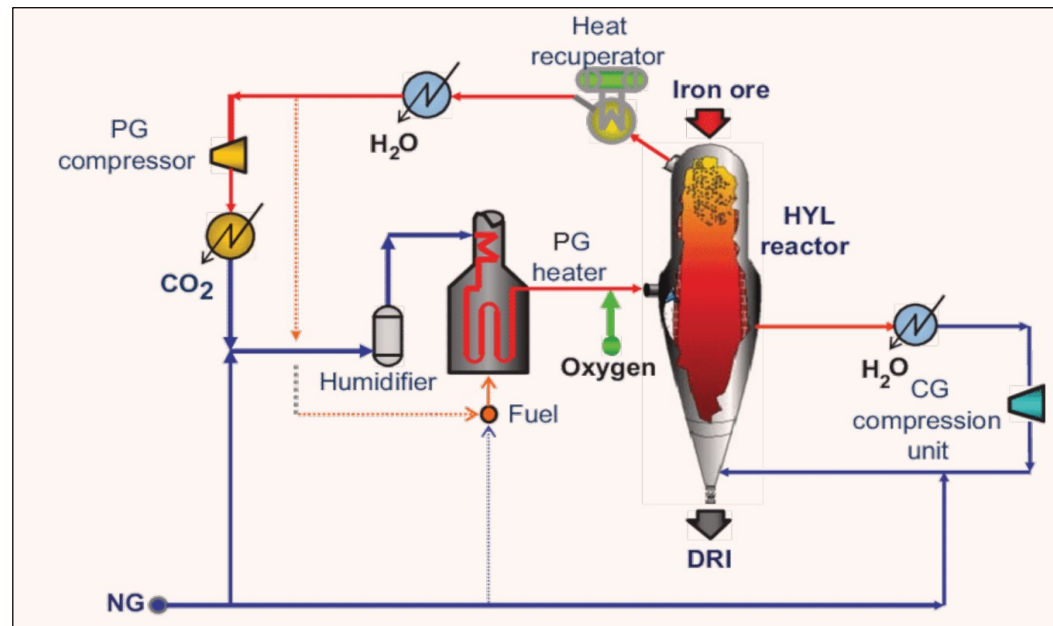
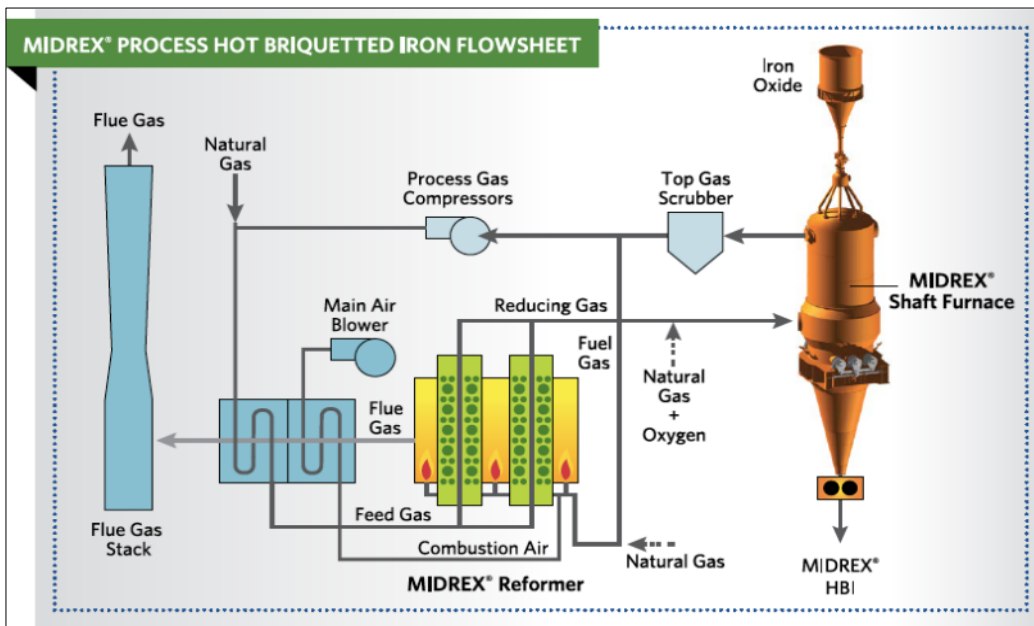
流程重构和 集成优化

- 下游工序可以和现有**长材或薄板坯连铸连轧产线流程**匹配衔接；
- 实现**钢铁制造流程重构优化和集成优化**。

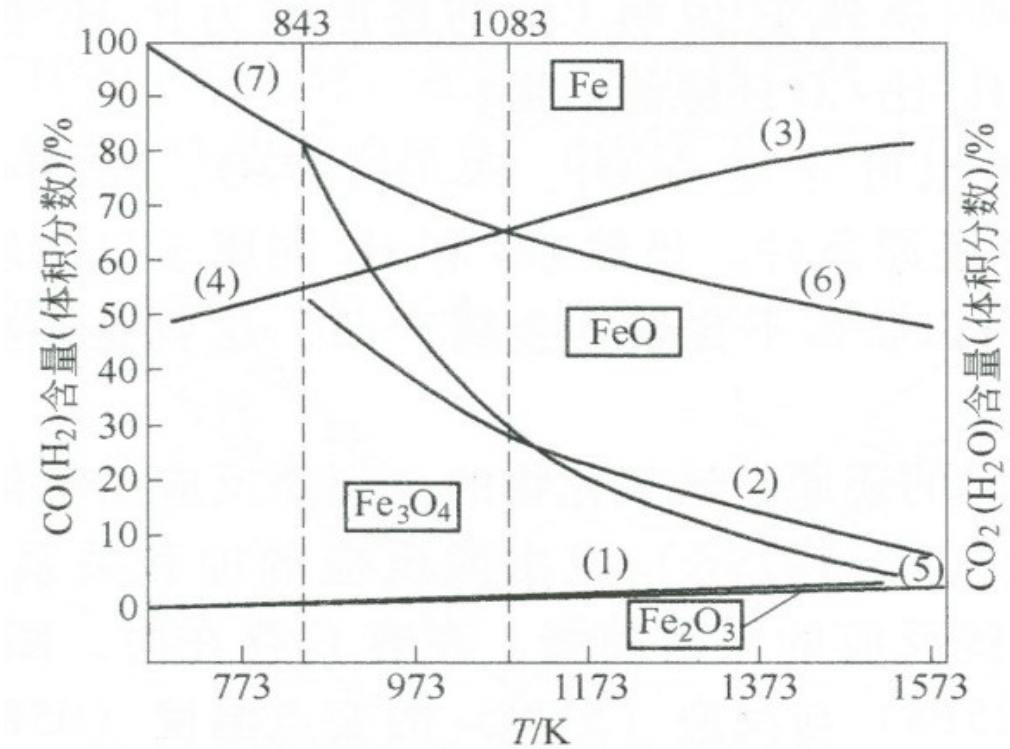
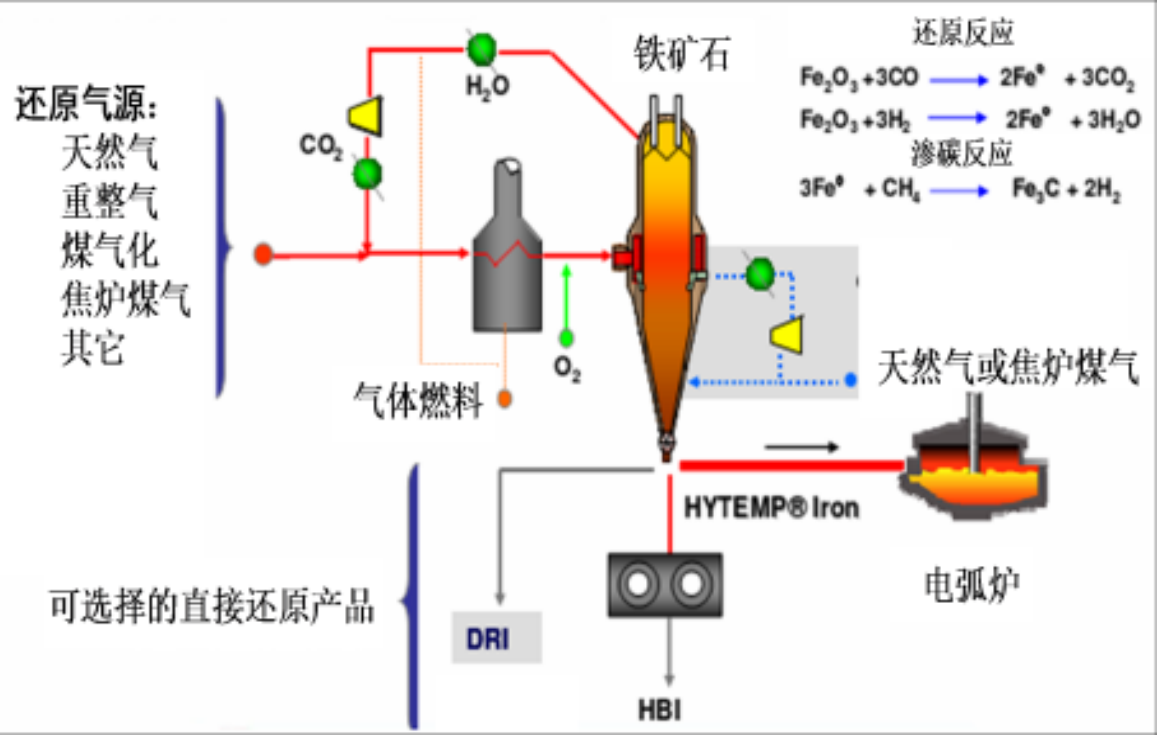
5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来

5.1 氢基（全氢）竖炉直接还原

- 气基竖炉直接还原法在气基直接还原法中占绝对主导地位，主要有Midrex法和HYL/Energiron法。
- 我国转炉-高炉长流程占90%以上，由于高炉无法完全摆脱对焦炭的依赖，实现碳中和的提升空间有限。基于绿氢气基直接还原铁+电炉冶炼+绿电是实现碳中和最为有效的技术途经。



氢基竖炉直接还原工艺



- (1) $3\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{CO} = 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO}_2$;
- (2) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{CO} = 3\text{FeO} + \text{CO}_2$;
- (3) $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$;
- (4) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{CO} = 3\text{Fe} + 4\text{CO}_2$;
- (5) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{H}_2 = 3\text{FeO} + \text{H}_2\text{O}$;
- (6) $\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}$;
- (7) $\text{Fe}_3\text{O}_4 + 4\text{H}_2 = 3\text{Fe} + 4\text{H}_2\text{O}$

$$\text{FeO} + \text{H}_2 = \text{Fe} + \text{H}_2\text{O}, \Delta H_{298}^\theta = 28\,010 \text{ J/mol}, \Delta G^\theta = 23\,430 - 16.16T$$
$$\text{CO} + \text{H}_2\text{O} = \text{CO}_2 + \text{H}_2, \Delta H_{298}^\theta = -41\,325 \text{ J/mol}, \Delta G^\theta = -304\,591 + 28.14T$$

5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来

5.2 高炉喷吹富氢气体燃料

(1) 理论研究和生产实践表明，通过高炉风口向高炉喷吹天然气，有利于提高高炉产量和降低燃料比。天然气富含甲烷和氢，高炉喷吹以后甲烷在高温条件下经过裂解变成 H_2 和 CO ，可以提高炉腹煤气中 H_2 和 CO 体积百分数，提高高炉煤气还原势。

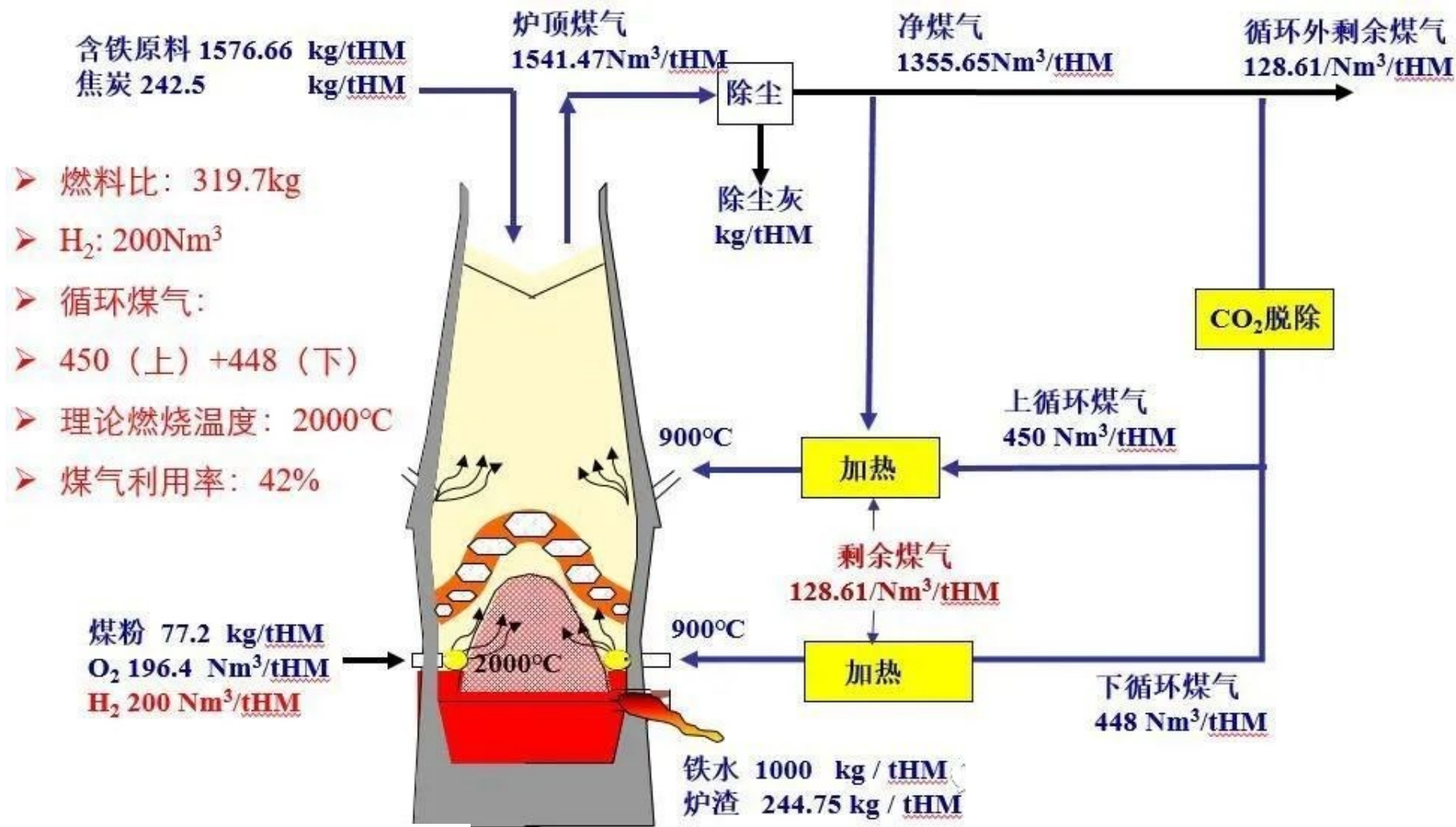
(2) 以 $5500m^3$ 高炉为例，根据理论计算，喷吹天然气 $30kg/t$ ，高炉预计每年可减排 CO_2 约为 $14.5万t/a$ 。如果喷吹焦炉煤气，由于 H_2 的体积百分数更高($> 50\%$)，理论上 CO_2 的减排效果会更加显著。

(3) 有条件的高炉喷吹天然气、焦炉煤气等氢基燃料，是减少碳素燃料消耗和 CO_2 排放的一个新的技术途径。

(4) 在当前技术条件下，“绿氢”的大量制备和使用仍处于研究探索阶段，规模化、商业化的应用还有待时日，与此同时经济性也需要结合碳减排政策制度量力而行，不可一哄而上。

5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来

高炉炉顶煤气脱除CO₂循环喷吹工艺流程



5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来



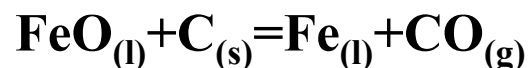
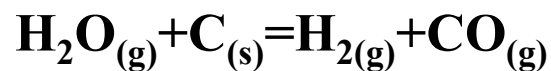
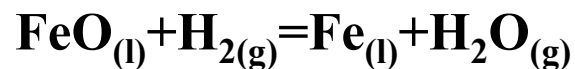
首钢集团
SHOUGANG GROUP

- 1 (进一步**加强料精技术研究**，探索并构建以**球团矿**为主的**新型炉料结构**，降低整个炼铁流程的碳素消耗和污染物排放；
- 2) **继续推进高煤喷氧富温风等的术技键关再创新**，进一步降低高炉燃料消耗，减少CO₂排放；
- 3) 加强特大型高炉操作规律的研究，建立**动态有序、协同连续、精准高效的现代高炉运行理念**，以**高炉生产长期稳定顺行为基础**，不断改善、优化、提升特大型高炉的操控水平；
- 4) 进一步加强**高炉运行过程的炉体维护**，采取有效技术措施延长高炉寿命；
- 4) 构建料场、烧结、球团、焦化、高炉炼铁系统**一体化智成集能管控**台平着重解决不同工序的界面技术优化，**实现全流程的智能化动态管控**；
- 5) **有条件的高炉喷吹天然气、焦炉煤气等氢基燃料**，**减少碳素消耗和CO₂排放**；
- 6) **发挥既有资源优势，碳低展开绿色铁炼新术技的探索究研**。依托国内外资源，开展有效降低碳素燃料消耗和碳减排工作矿铁硅低超。在采用复合喷吹氢基燃料和采用顶气脱除CO₂后循环等先进技术以后，**先进高炉比料燃降低到470kg/t下以进而实现CO₂少减放排20%上以**。

5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来

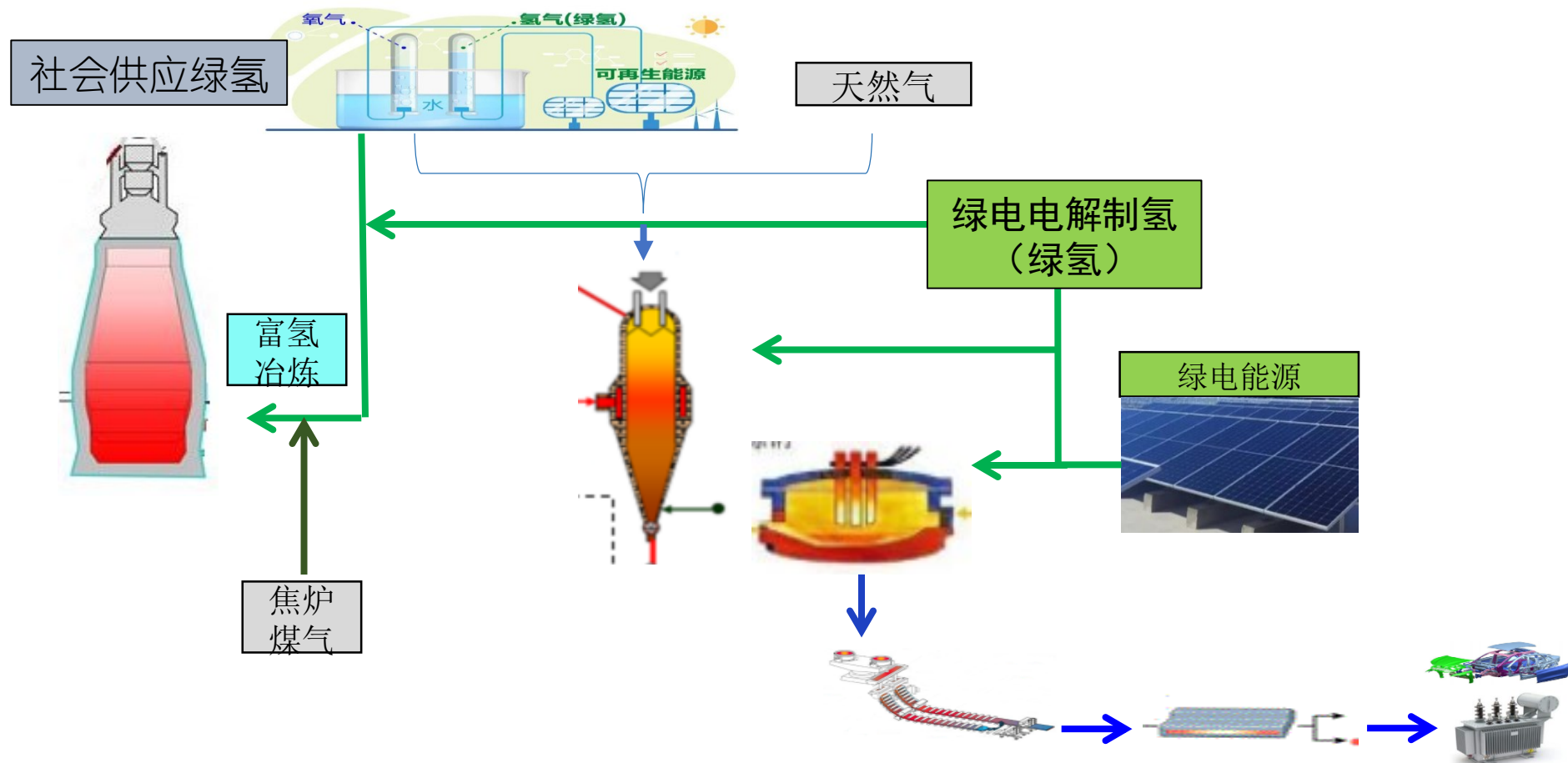
未来高炉工艺氢冶金的一些技术问题仍需要深入探索研究，主要包括：

- (1) H_2 还原液态氧化铁热力学和动力学机制；
- (2) H_2 还原过程的吸热和热量补偿问题；
- (3) 高炉冶炼条件下协同提高 H_2 与 CO 利用率问题；
- (4) 将喷入高炉的 H_2 加热到1 000 °C的工艺技术；
- (5) 全氢或富氢还原气喷吹的经济性问题等。



5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来

基于高炉-竖炉耦合的碳-氢冶金工艺流程

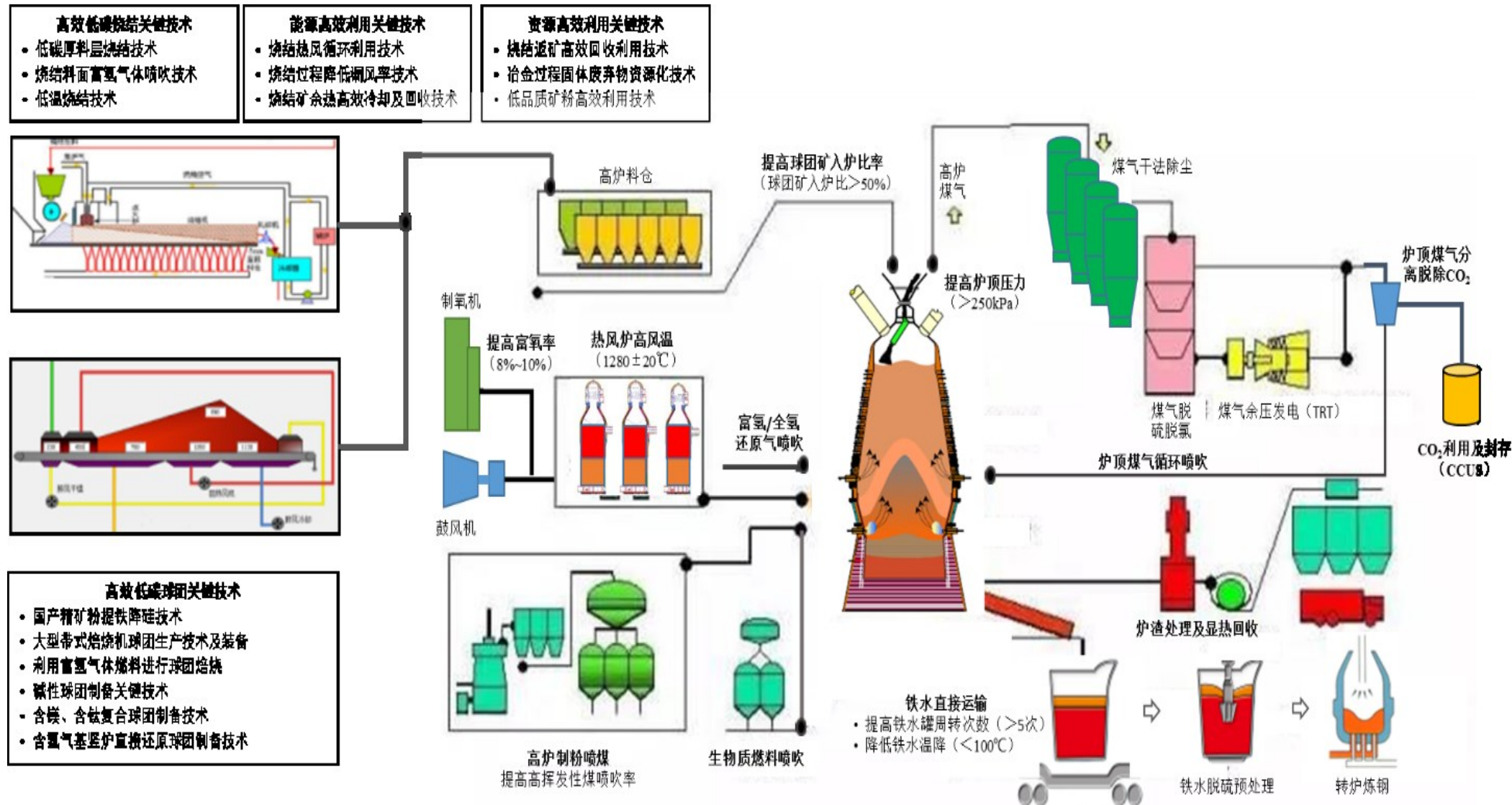


新一代基于绿氢-绿电的钢铁冶金工艺

5. 碳-氢耦合冶金与氢冶金的发展未来



首钢集团
SHOUGANG GROUP



6. 结语

(1) 在全应顺应时代潮流，在已有技术的基础上降低化石质碳素能源的消耗，改进工艺流程、创新关键技术，大幅度降低碳素消耗和CO₂排放。

(2) 当前技术条件下，以常规高炉冶炼为主流的炼铁工艺球碳达峰、碳中和的背景下，钢铁工业作为重化工业的代表性产业，，喷吹富氢燃料替代固体碳素燃料、炉顶煤气脱除CO₂后循环再利用、以高炉流程为基本工艺路线的碳-氢耦合还原；以绿氢为代表的气基竖炉直接还原和以生物质能源为驱动的球团矿制备等新兴技术，将在未来取得工程化应用和推广。

(3) 发挥既有资源优势，开展低碳绿色炼铁新技术的探索研究。依托国内外资源，优化炉料结构、提高球团矿入炉比率，积极推进造块工序有效降低碳素燃料消耗和碳减排工作。在采用复合喷吹氢基燃料和采用顶气脱除CO₂后循环等先进技术以后，先进高炉燃料比降低到470kg/t以下，进而实现CO₂排放减少30%以上。在高炉工艺技术优化的条件下，加强现有技术升级和极致能耗的降低，在本世纪30年代达到钢铁工业减碳50%的中期目标。

感谢聆听，敬请指正！

