

第二届铁前关键技术技能提升高级研修班

新时代高炉操作的特征及展望

刘全兴

2024年2月 石家庄



主要内容

contents

01

钢铁工业发展与面临的挑战

02

炼铁高炉操作的特征分析

03

降低炼铁系统制造成本的途径

04

未来炼铁绿色低碳发展方向

05

结束语

■ 一、钢铁工业跨越式发展与面临的挑战

- 中国钢铁工业100年来走过了光荣而艰辛的道路。我们在两个百年交汇点上一起回顾中国钢铁工业的发展历程，这里面有众多钢铁人的贡献和心血，我们应该感到光荣和自豪。2023年我国粗钢产量101908万吨，焦炭产量49260万吨。
- 历经坎坷，艰苦奋斗，粗钢达到世界第一，转型升级加速；
- 资源受困，成本高企，高成本时代到来，以需求激发内生动力；
- 减排环保，多举措应对时代“双碳”课题；
- 市场低迷，效益下滑，钢铁企业正经历前所未有的困局。

钢铁工业跨越式发展

我国钢铁工业发展迅速，粗钢产量连续5年愈10亿吨/a。在引领全球绿色低碳发展和应对气候变化是钢铁产业的重要使命，过去30年来，通过提高能源效率和推广新的回收工艺和技术的应用，全球钢铁行业每吨钢铁的综合能耗降低了50%。目前，全球钢铁行业约占全球“能源消耗”的8%，占全球碳排放的7%。随着‘碳达峰、碳中和’成为全球产业发展的主调，传统的钢铁产业发展模式已经无法满足低碳发展的需要，必须进行深化改革。

我国钢铁工业快速发展，炼铁工序功不可没。目前全世界高炉总数1500座，中国917座。产能庞大，面临资源供给、环境保护、制造成本等巨大挑战高炉实现高质量发展迫切需要与“双碳”产业协同发展。对高炉系统的技术进步具有较高的期待。

■ 钢铁行业面临 巨大“挑战” [5]

- 当前，钢铁行业面临的主要问题比较突出，三大痛点：
 - （1）钢铁行业产能庞大，产品市场竞争激烈，高端产品供需矛盾比较突出。行业集中度低，前10大钢企的产量仅占36%。
 - （2）资源安全问题突出。主要是外矿依存度高达80%以上，对外采购原料无话语权，受制于人；过高的外矿价格极大地推升了钢铁企业的制造成本和产业链的价格机制。
 - （3）环保压力巨大。“碳达峰”（2030年）、“碳中和”（2060年）任重道远。加大国土绿化，超低排放并举。

■ 钢铁行业面临巨大“挑战”

- **来自行业转型高质量发展的挑战：**钢铁企业规模庞大、产能置换资金需要量大。特别是落后产能淘汰缓慢，产品升级缓慢，企业经营成本上升。整合重组已经到来。势必成为智能化技术改造、高精尖产品升级和生态环保绿色发展的机遇。
- **来自自身的生存挑战：**搬迁，改造钱从哪来？带来的财务费用居高不下，较小规模的企业被“挤压”，竞争力下降。降低成本是钢铁产业的主题和长期任务。
- **来自资源环境的挑战：**铁矿石、焦炭、合金、水资源短缺，价格居高，铁矿石降价就是增效；碳达峰，碳中和。

■ 钢铁行业面临巨大“挑战”

- ❑ 来自市场与创新能力的挑战：高价进口铁矿石，却廉价出口钢材。根据中钢协数据，近两个月进口铁矿石价格上涨17.5%，受此影响每吨钢材成本约上涨10%，而同期钢材价格涨幅仅为5.5%，估计因铁矿石等大宗原燃料价格大幅上涨，钢企每吨钢材约有100元利润受到挤压。
- ❑ 根据国家统计年鉴数据，2019年我国出口钢材6429万吨，每吨平均出口价格为5753元人民币；向外国进口大量高端优质钢材1230万吨，每吨平均进口价格为7908元人民币。我国钢材出口平均价格只有进口价格的大约7成。

■ 炼铁系统是钢铁工业的重点工序

- 炼铁系统(包括烧结、球团、焦化、炼铁工序)的能耗占钢铁联合企业总能耗的70%，而炼铁工序占约50%，污染物的排放三分之二也来自炼铁系统。所以说，钢铁工业节能降耗工作的重点在炼铁系统。
- 坚定不移抓好精料，高风温，高富氧，高顶压，高煤比，低入炉焦比和提升能效。
- 追求低燃料比，低排放，低成本为目标。把全方位、多维度节能降耗研究作为降低成本的主攻方向。目前国内大多数钢铁厂都在开展节能挖潜项目落实。

二、炼铁高炉操作特征分析

员工素质

高炉精料

煤粉喷吹

副产品资源化深加工

能源管控

装备精良

提高风温

富氧鼓风

智能化、可视化、清洁化

管理规范高效

■ 炼铁高质量发展的内涵

- (1) 企业在于人为。员工素质好，上下工序协调，生产平衡，管理高效；
- (2) 高炉大型化，设备装备优良，高效配置，点检定修；
- (3) 坚持精料方针，合理炉料结构；增加球团、废钢配比；
- (4) 大力提高风温，提升能效。高炉使用好高风温，降低燃料比；
- (5) 采取高顶压操作，改善顺序，提高煤气利用率；
- (6) 提高高炉喷煤比，烟煤混合喷吹，高效喷吹；
- (7) 采用高富氧率，增产效益突出；
- (8) 高炉副产品深度资源化循环利用，煤气发电、微细粉等。
- (9) 高炉操作智能化、可视化，改善环境和降低劳动强度；
- (10) 能源管理，机构精简高效；安全、环保、加强成本管理，成本控制是生产经营的核心。

■ 企业在于人为

企业员工素质决定企业的全部。

首要的是钢铁企业领导层需要有一个好班子。忠诚企业，恪尽职守，洞悉市场变化，善于补短板、通堵点；

中层管理：通晓企业各工序流程；上下工序协调，生产平衡，管理高效，奖罚分明；

高炉管理者：业务水平过硬，对能源管理，安全、环保、加强成本管理，成本控制是生产经营的核心。

员工：爱岗敬业，诚实守信，钻研业务，完成任务。

■ 高炉大型化评价

- (1) 投资：3200m³高炉22亿元，500m³高炉2.5~3.0亿元。1:7
- (2) 产量：3200m³高炉8900t/d；500m³高炉2200t/d。1:4!!!
- (3) 人力成本：小高炉人员多，人力成本升高6000万元；
- (4) 效益：三座500m³高炉多产粗钢200万吨，超产效益10亿元。1:16!!!
- (5) 高炉使用原料条件不一样。大高炉用焦炭苛刻；
- (6) 操作与管理：小高炉冶炼周期短；更容易实现高顶压操作；
- (7) 小高炉机动灵活，遇到故障损失小。

综上所述，小高炉**建设费用低，建设周期短，冶炼周期短，效率高，容易操作和管理，就业人数多**等优点。

■ 炼铁精料

(1) 坚持精料方针，合理炉料结构；增加球团、废钢配比；

球团是一种优质冶金炉料，生产能耗低，产生污染物少，还原性好，是发展方向。

(2) 摒弃“经料”、“低品位矿冶炼”、“低成本战略”思维。所谓“经料”不可取。低成本可以实现，铁产量会少一大块，期间费用不会少。算账后不划算。我们知道，入炉品位和焦炭灰分都遵循“1、2、3”的定量关系，即入炉品位提高1%，焦比降低2%，产量提高3%；焦炭灰分也是如此。

(3) 焦炭。价格高，质量难以保证。采取一切手段降低焦比（燃料比）。

建议：市场好时，即吨钢利润高时，尽量用好料，产量高，风险小；

市场不好时，利润走低时，可以用“经济炉料”，不停产，保安全。

案例：（略）

炼铁使用高风温是绿色低碳技术的发展方向

- (1) 热风温度依然是炼铁控制成本的“主角”，风温占炼铁热量的25%~30%。风温达到1200度没有问题，高炉使用好高风温，降低燃料比已经常态化；
- (2) 热风炉面临的挑战仍然不小，“痛点”问题很多，诸如送风系统结构稳定性问题；煤气设施腐蚀问题；煤气脱氯、脱硫问题；环保达标问题等等。热风炉提升能源效率成为重点。
- (3) 热风炉操作智能化、可视化，改善环境和降低劳动强度；
- (4) 高效燃烧器和高品质耐火材料的开发与应用；
- (5) 热风炉优化设计，注重长寿与空间布局；
- (6) 安全、环保、能源管理智慧平台建设；

■ 热风炉改造，小投入，大收益的解决方案

- 小规模投资，不影响送风系统安全运行的前提下，采取措施有：
 - (1) 增加蓄热体装入量。不限形式，不限规整与否，装满就好。可提高风温30~40℃；
 - (2) 提高和稳定煤气压力，强化燃烧，可提高风温约10℃~15℃；
 - (3) 高辐射覆层技术的应用，可提高风温约20℃~25℃左右；
 - (4) 改造助燃风机；
 - (5) 改造换热器，提高预热温度；
 - (6) 富氧燃烧；
 - (7) 采用智能燃烧控制系统，可提高风温约10℃~15℃左右；
 - (8) 增加一座热风炉，可提高风温约50℃。
- 采用上述小幅度提高风温技术措施，提高风温20-40℃是可行的；若增建一座炉，经济效益十分可观。

□

■ 炼铁喷煤与减碳

- (1) 高炉喷煤技术成熟，安全可靠。喷煤是炼铁降低成本的主要措施之一，但是喷煤与减碳是一对矛盾；
- (2) 高炉喷吹好煤相当于好焦炭；
- (3) 喷吹较低灰分的煤粉，可以降低 (Al_2O_3) 百分含量，改善流动性；
- (4) 喷吹焦炉煤气等含氢介质要考虑成本因素；

■ 炼铁固废综合利用

- (1) 固废冶金原料循环利用要经过选铁、选碳；去除有害成分，尤其是含腐蚀性元素；
- (2) 开展冶金熔渣热量回收，蒸汽回收；

高炉富氧是个好举措

- 案例:某厂1080m³高炉装备精良,入炉品位58%~59%,风压360kPa,顶压200kPa,风温1200℃。拟新建一台3万m³/h制氧机专供高炉富氧,把高炉富氧率提高到10%,以期获得更多铁水和经济效益。计算如下:
 - 高炉冷风流量3300m³/min,富氧率由目前3%提高到10%,实际需氧气23000m³/h,每天用氧气552000m³/d。制氧机项目投资1.2亿元,未计设备折旧,仅氧气成本27.6万元/d。高炉富氧率增加1%,高炉增产4%;高炉富氧率3%,利用系数3.5t/m³.d,日产3780t/d,富氧率10%后,氧含量为29.17%。高炉增产1050t/d(27%),合计日产铁水4830t/d,吨铁用氧量114.28m³/t铁。按目前吨铁利润500元/t,增产效益52.5万元。扣除氧气成本27.6万元后,净利润为24.9万元/d。年工作日350天,年经济效益8715万元。制氧机投资不到2年收回。日钢富氧率已达10%,效益很好。沙钢5800m³高炉已实现富氧率10.55%。
- 富氧率达到50%,CO₂减排10%。

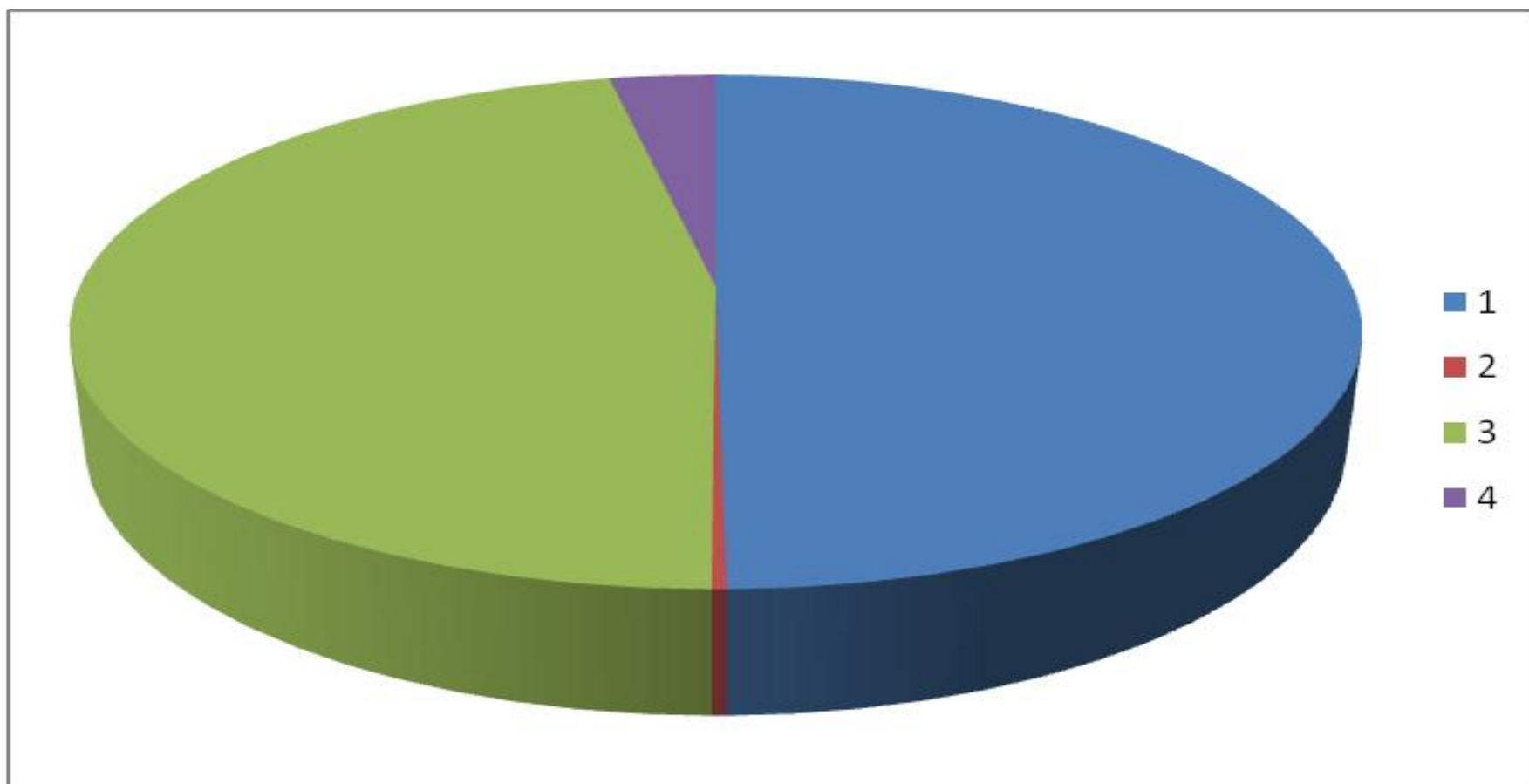
■ 炼铁智能化问题

- (1) 5G+工业互联网工厂场景化是国家计划，很快落地。
- (2) 高炉可视化应用广泛；高炉炉体各部监测与维护是关键。降低安全风险已经成为企业期盼；
- (3) 高炉、热风炉高温、高压设施面临更大的挑战。
- (4) 高炉、热风炉操作智能化、可视化，改善环境和降低劳动强度；
- (5) 能源管理智慧平台建设方兴未艾。（宝武、建龙等）

三、炼铁工序制造成本控制是核心

- 高炉炼铁工艺制造成本控制是关键。经统计和计算过国内多家钢铁厂炼铁制造成本，基本结论差不多，构成铁水制造成本：原料（烧结、球团、块矿、废钢等）占40%~45%，燃料（焦炭、焦丁、煤粉等）占42%~45%，**降低焦比是降低成本的“硬核”**。动力费占2%~3%.....什么原因？
- 主要原因：矿价太高，焦炭太贵；财务费用升高；
- 循环经济尚有潜力，没有“吃干榨净”。

成本分析实例（2018年）：原主材料（烧结，球团，小渣铁，废钢）：1084.21元；：辅料：6.75元；电费：68.66元；燃料（焦炭，煤粉）：1018.47元；其他；合计：2269.33元/吨铁



钢铁企业系统节能减排、降低成本的途径

1) 改造高耗能、低效工艺，采用先进成熟的节能技术；

2) 生产流程优化与改进，确立以高炉为中心的生产平衡高效模式；

3) 利用现有装备，寻求新的效益增长点；

4) 高效利用各种能源介质，提升能效，发挥其最佳功能；

5) 大数据指导物资采购，降低采购、物流、储运成本；

■ 钢铁企业系统节能减排、降低成本的作法（续）

6) 智能化工序控制技术应用 ;

7) 高效市场匹配技术的应用 ;

8) 钢材产品深加工 , 非钢产业大有可为 ;

9) 精简组织机构 ; 压缩开支 , 降低财务费用 ;

10) 制造成本控制是企业竞争力的核心。

钢铁企业常用能源介质价格变化

煤气名称	热值, kJ/kg	折算标准煤系数, kgce	当前参考价格
1千克标准煤	29300	1.00	1.283元
高炉煤气 (BFG)	3300	0.113	0.15元/m ³ ,
转炉煤气 (LDG)	7500	0.255	0.30元/m ³ ,
焦炉煤气 (COG)	18000	0.614	0.78~1.0元/m ³
天然气 (NG)	39000	1.330	1.95~4.00
液化石油气 (LPG)	50000	1.714	2.50~4.60
电	15500	0.529	0.55~0.60元/kWh
氧气	12600	0.429	0.50~0.55元/m ³
氢气 (氢气不是能源, 而是能源载体)			6.00~7.50元/m ³

钢铁企业能源平衡新趋势

- (1) 能源价格上涨，加重影响制造成本；
- (2) 绝大部分自产能源在体系内循环；
- (3) 成本控制需要重新评价能源需求，改变工艺用途；
- (4) 新能源发展规模壮大，消纳体系面临体制机制优化问题；
- (5) 能源效率提升成为新增长点，合理配置越来越受到重视！

焦炉煤气用于热风炉燃料富化混烧、发电和高炉喷吹受到质疑、冲击和挑战。

举例：宝钢热风炉混烧焦炉煤气19000Nm³/h.座。

氧气、氢气价格很贵，应用成本很高。

■ 钢铁企业提升能效原则

- (1) 能源科学配置、煤气能源不能降质使用；
- (2) 化学能优先循环使用，能源转化次之，获得最大的能源利用价值和效益；
- (3) 找准主攻方向，先几个问题，补短板，各个击破，久久围攻；
- (4) 采用工艺技术先进成熟、绿色低碳，流程顺畅，操作简单，运维费用低，安全可靠的项目。

■ 钢铁企业节能减排大有可为

(1) 煤气能源科学配置、煤气能源不能降质使用；化学能优先循环使用，能源转化次之，获得最大的能源利用价值和效益；

(2) 节电、节水、节风、节煤气等工艺技术先进成熟、开源节流，找准应用场景，开发绿色低碳产业。做到流程顺畅，操作简单，运维费用低，安全可靠。

(3) 余热、余能回收利用。冶金炉渣；冶金固废；水蒸汽；

(4) 冶金物流，堆存，配送，配料各环节大有可为。

(5) 财务费用、管理费用还有压缩空间。

■ 四、未来炼铁系统技术发展方向

- 大家知道，地球大气层中CO₂含量过高而导致的全球变暖问题已受到世界广泛关注，当前大气中CO₂含量已突破400ppm，并呈逐年上升趋势。钢铁行业的CO₂年排放量占全球总排放的6.7%左右，其中炼铁系统能耗和排放占据钢铁全流程总能耗和总排放的70%左右，面临着节能减排的重要挑战，而传统炼铁流程的节能减排几乎已到极限，世界各国正在逐步开展全新的低碳炼铁新工艺减排计划。目前，世界低碳炼铁技术可分为两类，一类是基于现有高炉炼铁工艺进行的技术创新；另外一类是非高炉炼铁新技术，其中分为熔融还原（始于1924年）和直接还原（始于1873年）。

未来我国炼铁技术发展的模式

- 当前我国钢铁行业和炼铁工艺面临的形势正处于转型升级的关键时期。国内外炼铁生产技术的发展迅速，减少碳排放成为重中之重，由此推动今后炼铁技术发展方向和模式。
- 短期内是适应市场环境的钢厂生存和发展的技术研发与应用；
- 中长期是低碳、低成本的工艺技术及智慧制造装备技术的研发与应用。研发相适应的装备、工艺和技术，如产城共融、低碳冶炼、智慧制造和低成本冶炼方面期待取得进展和为促进我国未来炼铁技术发展奠定基础。

■ 低碳高炉炼铁工艺已经工业化

- 高炉低碳炼铁技术目前可分为两类，一类是高炉富氢技术；另外一类是全氧高炉技术。目前，两种技术均处于工业试验阶段。全氧高炉技术理论上可将传统高炉的生产力提高2倍，焦比只需现在的1/3，同时，还可为钢铁厂提供更高热值的煤气，但目前无法解决焦炭的骨架问题，这也是全氧高炉一直以来的发展瓶颈。
- 煤气与炉料之间的“三传”（传热、传质、传能量）要满足炼铁生产的平衡和效率。更主要的是制造成本有没有现实优势？目前，焦炭价格飙升，成本差距有缩小趋势。
- 宝武集团湛江分公司氢基炉投产。

全氧高炉与氢冶金 (Hydrogen metallurgy)

- 据文献介绍，我国宝武八钢通过改造原有430m³传统高炉，搭建我国首个全氧高炉，力争打造我国首个面向全球、开放共享的工业级别低碳冶金创新基地。八钢氧气高炉的工业试验共分为两个阶段，第一阶段力争实现35%高富氧冶炼目标，计划用时3-4个月；第二阶段准备通过引入二氧化碳脱除技术，打通煤气循环工艺流程，实现50%超高富氧的目标，计划用3-4个月，该项目的最终目标为实现全氧冶炼。
- 国外已有实践，中晋太行30万吨/a氢基还原铁项目已投产。16位院士谈氢能：关注制氢成本与氢储运，强调做好氢能示范推进。

■ 氢冶金与“跨界组合”

- 在用氢替碳方面，德国教授Peter Schmoele计算表明，当用40kg/t氢气替代200kg/t煤比时，CO₂减排量从1527kg/tHM减少到1235kg/tHM，降低292kg/tHM。当然，从当前的价格体系来看，这是完全不经济的。
- 国外“跨界组合”，德国蒂森公司已发起并联合一些大公司开展了称之为“Project Carbon2Chem”的研究项目。
- 在国内中晋太行30万吨/a氢基还原铁项目已投产。投资10.5亿元。
(说明：30万吨/a 仅相当于一座230m³的高炉)
- 要密切关注制氢成本、运行安全、冶炼效果等。

氢气高炉和竖炉冶炼现状

- 由于焦炭用量减少，炉内气流阻力大幅增加，试验高炉与实际高炉（约4000-5000m³）的风口数量、焦炭运动形态均不相同，还存在大量热平衡和气体平衡等诸多技术课题有待攻克。
- 从高炉喷吹富氢燃料的炉况反应来看，当H₂%超过15%之后，炉料低温还原粉化严重；氢气在炉内的停留时间短，造成反应时间不足，间接还原度提升不足；氢气在风口大量吸热，造成风口温度降低，需要完善热补偿措施；氢气经还原反应后，产物水蒸气在后道工序造成结厚、腐蚀等情况；氢气的加入位置选择在炉腹下部风口还是设计单独的炉身下部风口等，这些问题都需要进一步的工艺技术、工业试验和数据支撑。

■ 氢气制取、存储和运输及面临的问题

- 早在2012年，郑少波教授指出[7]，成熟的制氢技术有石油类燃料的裂解转化、氧化等方法制氢和煤炭气化转化。该类技术使用的是高碳能源，仍然无法避免CO₂排放问题。此外，还涉及转化效率问题，因此不适合氢冶金。另外一种是水电解制氢，由于当前中国电能以煤发电为主，也存在CO₂排放问题，也不适合氢冶金。未来的制氢技术有微生物制氢、太阳能制氢和核能余热制氢，这些制氢技术无CO₂排放问题，虽然当前还无法实现大规模制氢，但为氢冶金的发展指明了方向[2]。

实现减排目标需要巨额投资

- 在2020年7月24日举办的全球财富管理论坛2021北京峰会上，中国气候变化事务特使解振华透露：“如果中国实现碳中和目标，大体上需要136万亿元投入。”据《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》估测，至2050年为止，中国实现1.5度目标 导向转型路径需要的累计新增投资额大概是138万亿元。按比例推算，中国钢铁行业为实现碳中和，需要投入约20万亿元的巨额投资，简单推算每年需投资5000亿元，吨钢每年需投资500元。而根据IEA的《钢铁技术路线图》，实现减排的包括加大废钢/电炉使用力度，改变能源结构：2050年全球传统高炉-转炉流程比重需要从2019年的70%降低到30%，熔融还原+转炉+CCUS的比重需要提高到10%，以废钢为原料的电炉钢比重需要从2019年的22%提高到38%，以氢还原DRI为原料的电炉钢比重将达到8%。改变能源结构需要巨额的投资，将大幅推高钢材的成本。

■ 五、结束语

我国钢铁工业跨越式发展极大地满足了中国现代化发展的需要，然而，面临诸多挑战。转型升级，绿色低碳发展进入攻坚阶段。

提出了炼铁系统高质量发展的具体内容和解决方案。炼铁技术进步要在长寿高炉、精料、高风温、富氧喷煤等方面共同发力，提质增效。

- 在节能降耗，提升能效方面明确提出了一系列具有操作性的措施。对未来炼铁系统技术进步，绿色低碳发展进行了展望。

参考文献

- [1] 骆铁军，中国钢铁工业运行与展望，钢铁精英
- [2] 杨天钧等，关于新形势下炼铁工业发展的认识，湛江会议
- [3] 朱仁良，关于未来炼铁技术发展的探讨，中国炼铁网，2022-03-17，2019年全国高炉炼铁学术年会摘要集
- [4] 刘全兴，炼铁产业高质量发展的思考，辽宁朝阳，2019
- [5] 郑少波，氢冶金基础研究及新工艺探索，中国冶金，2012（7）：1-6。

谢谢！

**Thank you for
your attention!**