

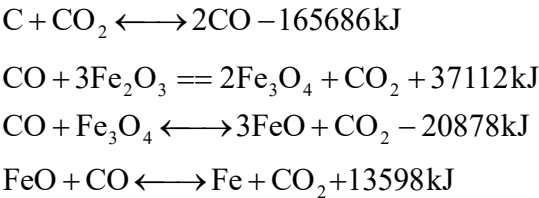
新湖煤焦专题：不用焦炭也能炼铁，氢还原铁技术介绍

在碳中和与碳达峰的大背景下，近日，经国务院同意，国家发展改革委联合生态环境部、工业和信息化部、科技部、财政部、住房城乡建设部、交通运输部、农业农村部、商务部、市场监管总局印发《“十四五”全国清洁生产推行方案》。文中除了提到大力推进非高炉炼铁技术示范,推进全废钢电炉工艺。完成 5.3 亿吨钢铁产能超低排放改造、4.6 亿吨焦化产能清洁生产改造，这些我们比较熟悉的举措外。在专栏 4 中提到了氢能冶金。

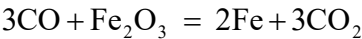
专栏 4 清洁生产产业培育工程
支持开展煤炭清洁高效利用、氢能冶金、涉挥发性有机物行业原料替代、聚氯乙烯行业无汞化、磷石膏和电解锰渣资源化利用等领域清洁生产技术集成应用示范。培育一批拥有自主知识产权、掌握清洁生产核心技术装备的企业和一批高水平、专业化的清洁生产服务机构。

传统上使用焦炭与铁矿石放入高炉中产生氧化还原反应炼铁。焦炭在高炉中提供热量与造气产生一氧化碳。一氧化碳带走氧化铁中的氧，形成铁元素与二氧化碳。导致炼铁环节碳排放较高。

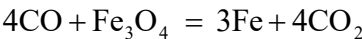
高炉还原反应式：



赤铁矿炼铁（简化）：



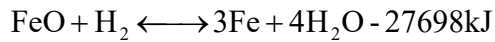
磁铁矿炼铁（简化）：



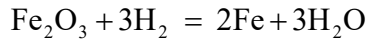
氢还原是使用高温的还原气作为还原剂，用于钨、钼、钴、铁等金属粉末和锆、硅的生产。氢气在带走铁矿中氧的同时产生水分，并不会像高炉炼铁产生二氧化碳，为较为环保的生产方式。只要使用绿电，可以达到全流程接近零碳排。与其他方法（如碳还原法、锌还原法等）相比，产品性质较易控制，纯度也较高。

在温度达到 810 度以上时氢还原法的还原能力是高于一氧化碳, 低于 810 度则相反。

氢还原铁过程:



氢还原铁方程 (简化):

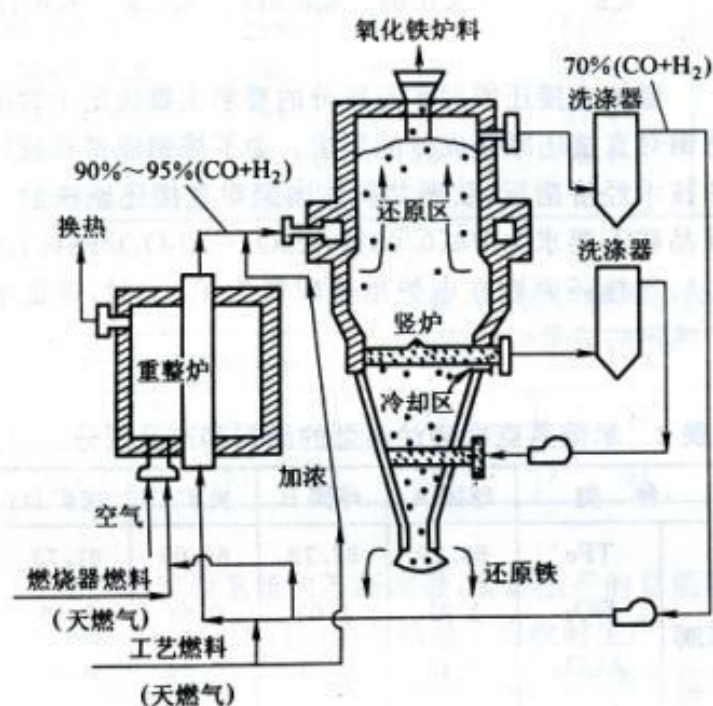


氢还原铁涉及的直接还原法按工艺设备来分, 有三种类型, 包括竖炉法、反应罐法和流态化法, 其中竖炉法中的米德莱克斯法与罐式法的 HyL-III 法占据较大部分:

竖炉法

分为米德莱克斯法、普罗费尔法与维伯尔法。以米德莱克斯法为代表, 使用氧化球团和块矿作原料从炉顶加入, 从竖炉中部进风口通入热还原气, 炉料在与热风的逆向运动中逐渐被热还原气加热还原成海绵铁。为防止其氧化, 再用竖炉下部送入的冷却气冷却到 100°C 以下, 或经钝化处理, 或不经冷却将海绵铁在热态下压制成块状, 又称热压块 (HBI)。此法传热、传质效率好, 能耗低、产率高、质量好, 发展最快。; 普罗费尔法的特点是采用蓄热式催化转化天然气工艺制得氧化度低、温度高的还原气。该竖炉无冷却带, 热海绵铁产品在隔绝空气条件下排入密封料罐送电炉热装、或热态压块。缺点是操作较复杂, 该法只在伊朗有生产厂; 维伯尔直接还原法则以焦炭或木炭作燃料, 用电阻供热气化竖炉制取还原气, 经脱硫、调温后从还原竖炉底部送入, 将竖炉顶部加入的铁矿石预热、还原, 其中一大部分从炉子中上位置抽出送往气化炉制取还原气。该法低压作业, 作业周期长、生产率低且设备未能大型化。后期采用等离子供热, 用块煤代替焦炭, 生产能力才得以扩大。

图表 1: 米德莱克斯法工艺流程

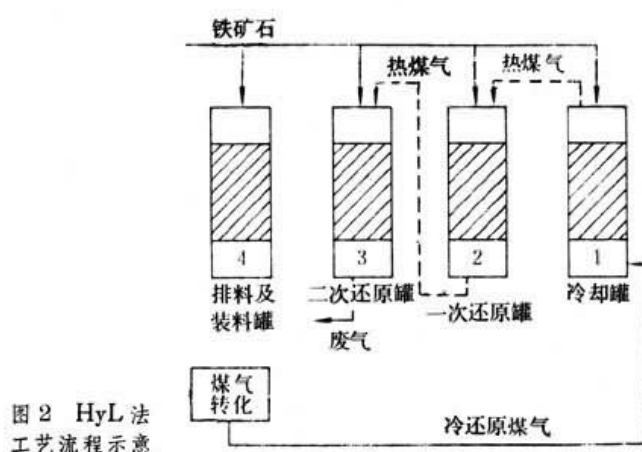


米德莱克斯法标准流程图

罐式法

1957 年开发于墨西哥。旧法为 HyL 法，1979 年 HyLsa 公司对 HyL 法进行改进，将天然气重整、转化与还原气的反复冷却、加热合并，实现工艺的连续化，生产热效率和生产率显著改善，产品稳定、能耗下降，改进后称 HyL-III 型。该法作业稳定，设备可靠，推广较快。是将铁矿石装入反应罐内，通入用天然气经水蒸气催化转化制备的还原气，依次完成预热、预还原、还原、渗碳冷却，成品从罐中卸出等工序。罐式法产品质量不均匀；经多次将还原气冷却、加热，因此热耗较大，煤气利用不好。HyL 法和 HyL-III 法合计的直接还原铁产量仅次于米德莱克斯法。

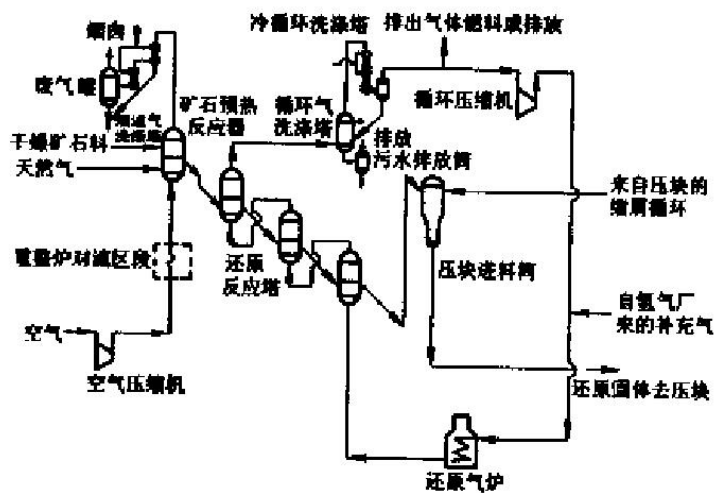
图表 2: 罐式法 HyL 工艺流程



流态化法

1960 年开发，80 年代实现生产正常化。流态化直接还原法指在流化床中用煤气或天然气还原铁矿粉的方法，基本原理是细粒矿石料被穿过的气流流态化并依次被加热、还原和冷却，还原产品冷却后压块保存。采用流态化直接还原法的典型工艺包括 FIOR、H-IRON、NU-IRON 和 HIB、NOVALFER。该法用天然气或石油与蒸汽催化转化或部分氧化法制备含 CO、H₂ 与 N₂ 的混合气，经脱除 CO₂ 后与净化循环气混合作还原气。还原气被加热到 840℃，由下而上逆向通过四段流化床。铁矿粉在重力作用下顺序进入预热、预还原、还原各流化床，还原后海绵铁粉通过压块机进料筒送入压块机压块。流态化法不需造块、充分利用粉矿比表面积大、还原快的优点，获得设备的高生产率。但其产品活性大、不稳定，必须钝化或压块处理，且总能耗偏高。

图表 3: 流态化法工艺流程



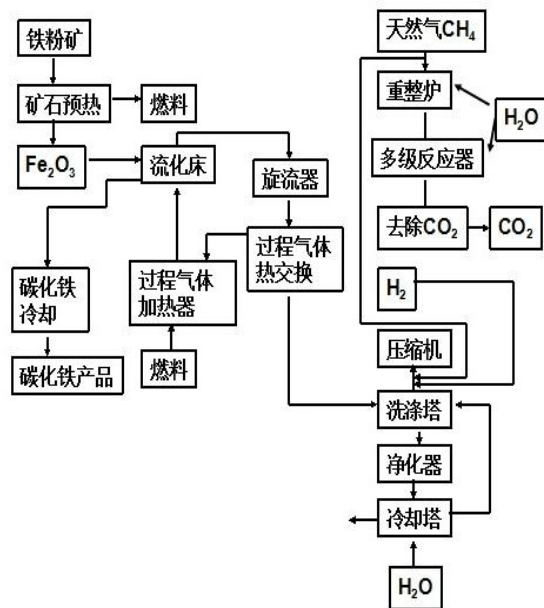
菲奥尔法的设备布置及流程

碳化铁法

美国海森调查公司开发。将铁矿粉送入流化床内，通入主要成分为 H_2 和 CH_4 的热还原气，在 $550\sim 600^{\circ}C$ 、 $0.18MPa$ 下进行反应，制得含有 6%C 的铁产品，产品含碳高，冶炼燃烧放热，可实现炼钢过程热量自给，降低炼钢电耗：



图表 4: 碳化铁工艺流程



不过目前全球氢气直接还原工艺还处于研发、试验阶段，工业化生产仍存在一些需要解决的问题。北京科技大学原校长杨天钧教授在此前的授课期间也提到未来钢铁行业，高炉作为传统炼铁工艺，仍然是未来几十年炼铁工业的核心，氢还原技术发展的过程还需要很长的时间铺垫，目前面临几大难题：

1. 温度控制。氢气还原铁氧化物为吸热反应，当还原气体为纯氢气时，还原气体进入竖炉进行反应后直接还原铁会被冷却。为了保证还原反应的稳定进行，需通过加装预热装置或是改进工艺以实时向反应系统中提供能量以保证还原温度恒定。

2. 氢基成品的应用。大多数直接还原铁用于电炉炼钢。目前电炉炼钢工艺的增碳方式主要是利用金属炉料（如直接还原铁、热压块铁、生铁）或纯碳。在注入氧气后，碳燃烧会产生巨大热量，减少电力消耗，并实现快速融化。大多数电炉钢厂更倾向于采用碳含量为 1.5%-3% 的直接还原铁，而氢基直接还原工艺生产的直接还原铁中碳含量极低，会对电弧炉冶炼产生负面影响，故氢基直接还原铁的应用成为未来需要解决的问题之一。

3. 绿氢生产成本过高。氢气的来源比较广泛，主要有化石能源制氢、含氢物质制氢、化工副产品氢气回收、太阳能和风能制氢等，但就目前来看，大部分绿色氢气生产成本过高，仅有少部分灰色氢气从成本上能够用于氢气直接还原生产。

以中国为例，根据国际能源署的数据，中国生产氢气不同技术路径的成本分别为：电解水制氢 5.5 美元/kg，可再生能源发电制氢 3 美元/kg，天然气制氢 1.8 美元/kg，煤制氢 1 美元/kg。我国 20 年产量煤制氢的氢气占比约 62%、天然气制氢占 19%，工业副产占 18%、电解水制氢仅占 1%。

日本钢铁协会估算生产 1 吨生铁需要 601 标准立方米氢气，补偿吸热反应需要 67 标准立方米氢气，加热融化到 1600 摄氏度需要 85 标准立方米氢气，共计需要 753 标准立方米氢气，按照 75% 的热效率计算，产生 1 吨生铁需要的氢气量为 1000 标准立方米。在一般状况下，氢气密度 0.0899 千克/立方米，1000 立方米约等于 89.9 公斤。

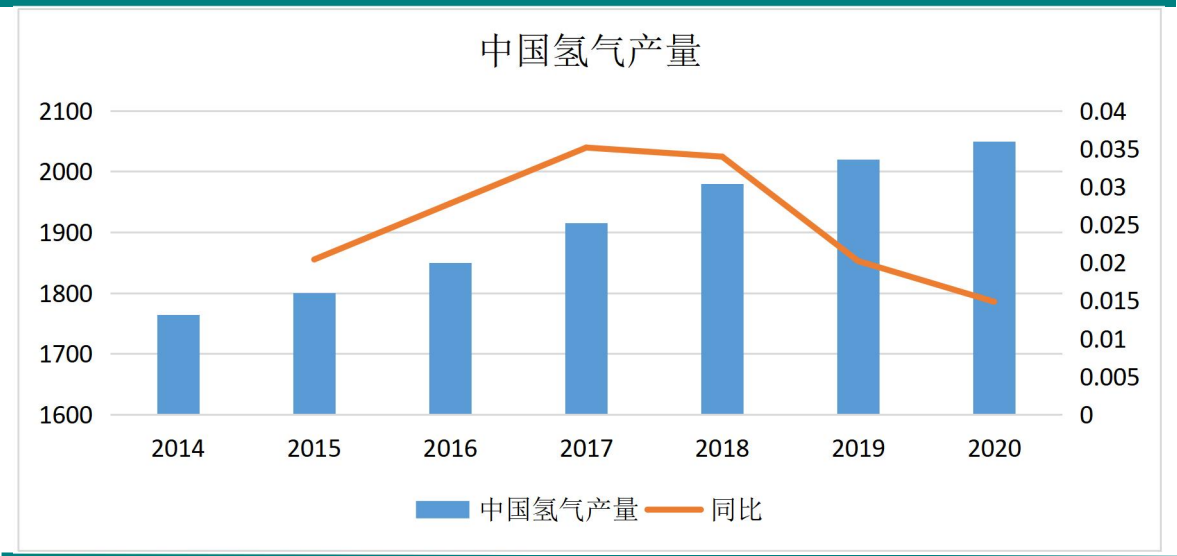
协会还按照当前的炼焦成本估算出钢铁行业可以接受的氢气成本为 7.7 美分/标准立方米，按汇率换算也就相当于 0.56 元/标准立方米，当前的煤制成本换算约 0.63 元/标准立方米，天然气约 1.13 元/标准立方米，可再生能源约 2.17 元/标准立方米，电解水制氢约 4 元/标准立方米。

虽然煤制氢炼铁成本大约 600 多，但氢气运输与管道成本较高，地域限制强。另外用煤制备 1 公斤氢气会排放约 10 公斤二氧化碳，等于吨铁碳排约 900 公斤，

高炉炼铁每吨炭排约 1200 公斤，煤制氢也不是非常环保的方式。第二便宜的天然气制氢同样会排放大量二氧化碳，以化学式推算生产 1 公斤氢气会产生 5.5 公斤二氧化碳，如算上能耗损失与其他耗材，将高于 5.5 公斤。可再生能源与电解水制氢则过于昂贵。

根据中美绿色基金调研，当前对于运输用氢能部分，示范城市的氢气补贴标准为 35 元/公斤。如果以 4 元每立方米的电解制氢换算，每公斤制氢成本约为 44 元，约可以补上 80% 的制氢成本，可再生能源制氢成本约为 24 元/公斤，基本可以完全覆盖。后期如为促进钢铁行业绿色发展或也出台补贴政策。不过运输用氢存在储氢站与售氢的加注费用，较单纯制备多出 20-30 元/公斤，对于钢铁行业用氢的补贴或低于运输行业。

图表 5：中国氢气产量



4. 产量增长较慢。中国氢气产量每年大概以 50 万吨速度增长，即便全部给炼铁使用，仅够生产 556 万吨铁水，我国 2020 年产量约 8.8 亿吨，在铁水不增长的情况下，约需要近 158 年才能完全覆盖炼铁需求。且约 900 万吨为焦化行业的副产氢，大部分氢气是作为能源使用。

IEA 预计到 2030 年全球才会产生较具商业规模性的氢还原铁生产，如果要达到全球到 2050 年钢铁行业零排放的愿景，至 2030 年氢气在钢铁行业的运用至少需要翻三倍，至 1800 万吨，约等于 1.35 亿吨的铁水生产需求量。但是目前 IEA 统计的全球 2030 年以前筹备的项目仅有 50-80 万吨，仅占 1200 万吨增长目标不到 7%。不仅是中国，全球对于氢还原铁的投资都是偏弱的。

综合来看氢还原铁虽然与碳中和的国策相符，可以实现钢铁行业零碳排，但当前技术方面仍面临一定难题，整个氢还原铁产业处于探索研发阶段，且国内对于氢

气产能的投资不足，短期快速扩展规模难度很大，成本较高的问题难以解决。关注后期是否出台对于钢铁行业用氢的补贴政策。近十年预计国内铁水仍会以高炉生产为主，对高炉的挤占效应主要来自于成本相近的电炉，氢还原铁技术对原料焦炭的冲击不会太大，但长远来看，氢还原铁将会逐步取代高炉的地位。

数据来源：新湖研究院、IEA、中美绿色基金、Chemicalbook、公开资料整理

新湖期货黑色组

审核人：李明玉

免责声明

本报告的信息均来源于公开资料，我公司对这些信息的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所包含的信息和建议不会发生任何变更。我们已力求报告内容的客观、公正，但文中的观点、结论和建议仅供参考，报告中的信息或意见并不构成所述品种的操作依据，投资者据此做出的任何投资决策与本公司和作者无关。