

# 采用封闭式加热炉同时生产海绵铁，石灰和无氮型煤气技术

金家敏

上海材料研究所，上海  
Email: jjm82@163.com

收稿日期：2021年4月28日；录用日期：2021年5月28日；发布日期：2021年6月4日

---

## 摘要

本文阐明了利用封闭式加热炉同时生产海绵铁，石灰和无氮型高热值煤气的理论和实验结果。利用氧化铁中的氧直接生产无氮的煤气，利用石灰石分解的二氧化碳和碳生产无氮的煤气，利用石灰捕捉烟道气二氧化碳，这个技术的优点是自然资源得到完全利用，煤炭耗量大大下降，经济效益显著，二氧化碳排放量超过国际能源署要求捕捉掩埋的数量，对生产海绵铁的各种炉型进行了讨论，高炉型应当是能耗最小的炉型，文中也提到了“过度捕捉”。

## 关键词

封闭式加热炉，海绵铁，石灰，二氧化碳

---

# The Technology of Producing Sponge Iron, Lime and Nitrogen-Free Gas Simultaneously with Enclosed Heating Furnace

Jiamin Jin

Shanghai Research Institute of Materials, Shanghai  
Email: jjm82@163.com

Received: Apr. 28<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 28<sup>th</sup>, 2021; published: Jun. 4<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

In this paper, the theoretical and experimental results of simultaneous production of sponge iron,

lime and nitrogen-free high calorific value gas by enclosed heating furnace are expounded. The oxygen in iron oxide is used to produce nitrogen-free gas directly. Nitrogen-free gas is produced from carbon dioxide decomposed by limestone and carbon, making use of lime to capture carbon dioxide in flue gas. The advantage of this technology is that natural resources are fully utilized. Coal consumption is greatly reduced and economic benefits are remarkable. Carbon dioxide emissions far exceed the IEA's requirement to capture buried amounts. Various furnace types for producing sponge iron are discussed. Blast furnace type should be the least energy consumption furnace type. It also refers to "over capture".

## Keywords

Closed Heating Furnace, Sponge Iron, Lime, Carbon Dioxide

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

目前, 世界上生产粉末冶金用的还原铁粉都采用隧道窑, 用煤或煤气加热。瑞典哈格纳斯公司是世界上最大的生产粉末冶金用的还原铁粉公司, 在美国设有子公司。我国现有三个大的粉末冶金用的还原铁粉生产厂, 武钢有四条 150 公尺长隧道窑, 年产铁粉 5 万吨, 山东莱钢 6 万吨, 马钢 2 万吨, 都采用隧道窑。我国第一条隧道窑开始生产还原铁粉的是上海粉末冶金厂, 因设计年产量为 700 吨, 太小, 现已被拆。

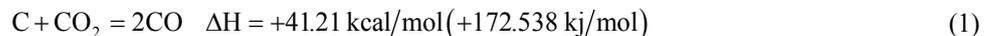
另外, 大量生产海绵铁还有迴转炉, 主要用于电炉炼钢。

海绵铁生产和石灰生产的一个共同点是矿石只用了一半, 另一半被抛弃了。铁矿  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  只用了铁, 其中的氧被抛弃了。石灰石  $\text{CaCO}_3$  只用了氧化钙, 其中二氧化碳被抛弃了。可贵的自然资源被糟蹋, 还污染了空气。

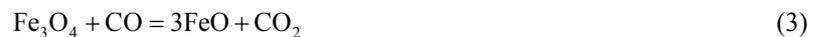
本文旨在阐明采用封闭式加热炉同时生产海绵铁, 石灰和无氮型高热值煤气的理论和技术。

## 2. 碳还原氧化铁反应罐内的反应

生产海绵铁的反应罐内, 还原剂碳粉和氧化铁粉是分层堆放, 其中存在下列几个反应, 在还原剂碳粉层中发生碳气化反应, 即

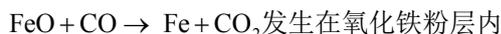


这是一个吸热反应, 体积增加一倍, 反应生成的 CO 扩散到氧化铁粉层, 发生还原反应。即



从 Fe-C-O 反应平衡图(冶金教科书中可以看到), 这三个还原反应是分阶段进行的, 即  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 。三个阶段还原反应的平衡气相成分不同。

在碳粉层和氧化铁层之间发生循环反应, 即



如此循环不断，完成了还原过程，得到了铁。

由反应式  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{C} = 2\text{Fe} + 3\text{CO}$  计算，生产一吨海绵铁，消耗了 321 公斤还原剂碳，同时生产了 600 立方米无氮的高热值煤气。

反应式表明：还原反应结果既能得到海绵铁，又能得到无氮型的煤气。遗憾的是目前的生产只得到铁，氧化铁中的氧与碳生成二氧化碳排放到空气中，既糟蹋了宝贵的自然资源，又污染了空气。

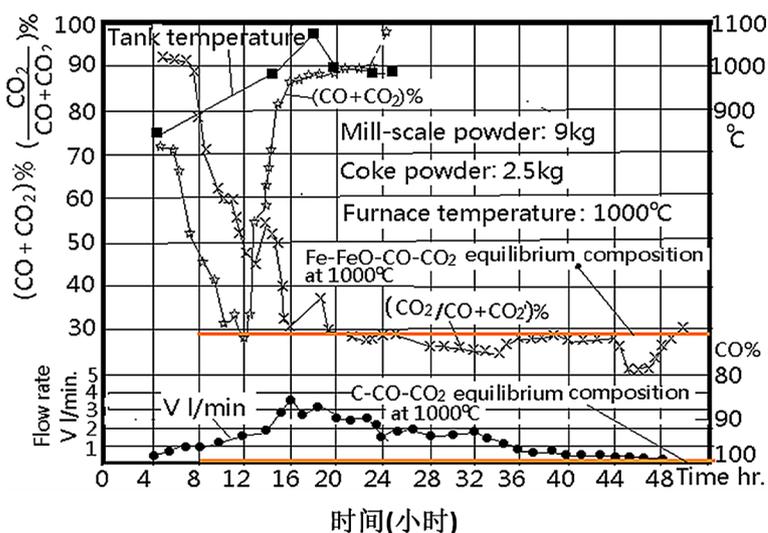
采用封闭式加热炉内可以同时生产海绵铁和煤气，这是普通的原理。

同样的原理，在封闭的反应罐中把石灰石和碳放在一起，加热到 1000°C 度，同样可以得到石灰和无氮的高热值煤气。

### 3. 两个实验测定

#### 3.1. 煤气隧道窑中碳还原氧化铁过程测定[1] [2] [3]

图 1 是还原反应罐中放出的煤气气体成分和流速测定结果。



**Figure 1.** 38.5 meters long tunnel kiln gas composition and flow rate in the reduction reaction tank (two red lines in the figure are  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  and  $\text{CO}_2 + \text{C} + 2\text{CO}$  reaction equilibrium composition lines, respectively)

**图 1.** 38.5 公尺长隧道窑还原反应罐中放出的煤气气体成分和流速(图中两条红线分别是  $\text{FeO} + \text{CO} = \text{Fe} + \text{CO}_2$  和  $\text{CO}_2 + \text{C} + 2\text{CO}$  两个反应平衡成分线)

这个实验是在生产现场进行的，隧道窑长 38.5 公尺，总共做了 9 次测定。图 1 是其中的一次测定结果。

实验用的氧化铁粉，碳粉，料重以及反应罐尺寸大小等与现场生产完全相同，不同的是内层由 2 mm 厚钢板焊接成，反应罐全部焊接密封，仅在顶端留下一个 8 mm 孔，插入一根直径 8 mm 约 2 公尺长的耐热不锈钢管，与反应罐接缝处亦焊接密封。不锈钢管的另一端引向窑车底部坑道，然后连接上长 50 公尺的橡皮管引向炉外，接上气体流量计和气体分析仪。

根据图 1 曲线，得到三个重要结论：

1) 氧化铁还原反应是分阶段进行, 即  $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO} \rightarrow \text{Fe}$ 。其中,  $\text{FeO}$  (浮氏体)还原时间延续最长, 接近 30 小时。这个结果与教科书上描述的完全一致, 与  $\text{Fe-C-O}$  反应平衡图或  $\text{Fe-O}$  相图是一致的。

2) 将测定的气体成分和碳气化反应以及  $\text{FeO}$  还原反应的平衡气相成分相比较, 证明碳气化反应是还原过程反应速度最慢的环节, 它控制了整个还原过程速度。因此, 在还原剂碳中加入催化剂就能有效的加速还原过程速度, 提高生产率。

3) 还原过程与渗碳过程截然分开。还原过程和渗碳过程之间存在一个“还原终点”, 只有还原过程完全结束,  $\text{FeO}$  相完全消失以后气相成分才能转变为渗碳气氛。1000°C时, 还原  $\text{FeO}$  的平衡气相成分中  $\text{CO}_2$  含量约是 28%, 而渗碳时, 与  $\text{Fe}_3\text{C}$  相平衡的  $\text{CO}_2$  成分几乎为零, 一氧化碳的含量几乎是 100%。每天检查海绵铁锭质量时, 只要海绵铁锭内有微量黑色氧化铁, 碳的含量始终低于 0.03%, 表明没有进入渗碳阶段。

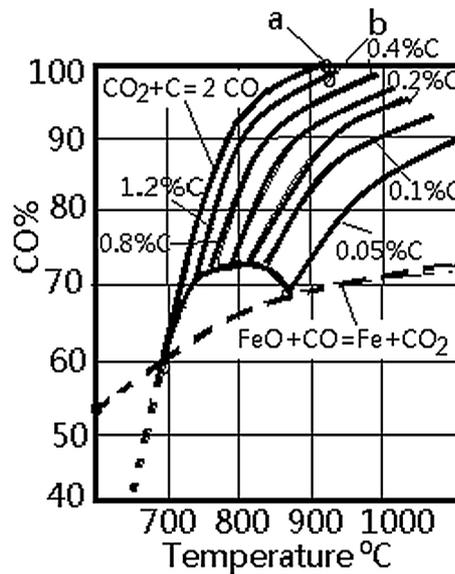


Figure 2. Fe-CO-CO<sub>2</sub> equilibrium diagram  
图 2. Fe-CO-CO<sub>2</sub> 平衡图

从图 2 可以看到, 还原气氛与渗碳气氛完全不同。

从图中看到, 还原反应时从反应罐中放出的气体的速度最高时可以达到 3.5 升/分 (9 kg 氧化铁粉)。如果按照平均 2 升/分计算, 一个反应罐可以放出 4.8 立米煤气 (因化学反应平衡原因, 还原煤气中总含有二氧化碳), 一台窑车有 36 个反应罐, 就能够放出 173 立米煤气。如果每一小时推进一车, 一天就能放出 4000 多立米煤气。上述结论告诉人们生产海绵铁的同时也生产了煤气, 而且煤气中几乎没有氮气, 是高热值煤气, 因为装满氧化铁粉和碳粉的反应罐中残留的空气很小, 而且在开始时很快就被排出。

### 3.2. 双料盒实验研究[4] [5]

实验 1 得到的三点重要结论, 为双料盒实验奠定了可靠的理论基础。双料盒实验有三个明确的研究目的: 一是研究文献中甚至中学教课书中广泛流行的化学反应模式催化反应机理是否可信; 二是验证电子循环授 - 受催化机理或电子轨道变形 - 回复循环催化机理是否可靠; 三是寻找一个催化剂, 提高碳气化反应速度, 提高海绵铁生产率。

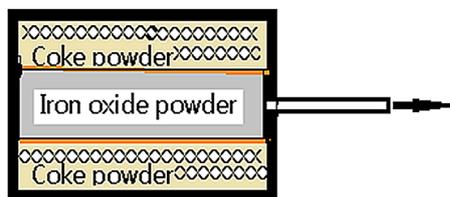


Figure 3. Experimental box  
图 3. 实验用料盒

图 3 为实验用料盒，料盒尺寸为  $100 \times 40 \times 40$ ，由 2 mm 厚钢板焊接，全封闭，仅留一个直径 8 mm 出气孔，还原反应气体引出炉外，接上气体流量计和气体分析仪。双料盒实验测定完全是在实验室中进行，两只料盒同时放在箱式电炉中同一温区加热。料盒尺寸和实验原料完全相同，不同的是还原剂碳层中加入不同催化剂，如：Fe-无催化剂，Fe-Cu，Fe-Ni，Fe-Ag，Cu-Ni，无催化剂-S，无催化剂-SiO<sub>2</sub> 等。根据煤气流速，煤气中二氧化碳含量，以及得到的海绵铁中碳的含量多少等三个数据，判断催化剂催化活性大小。

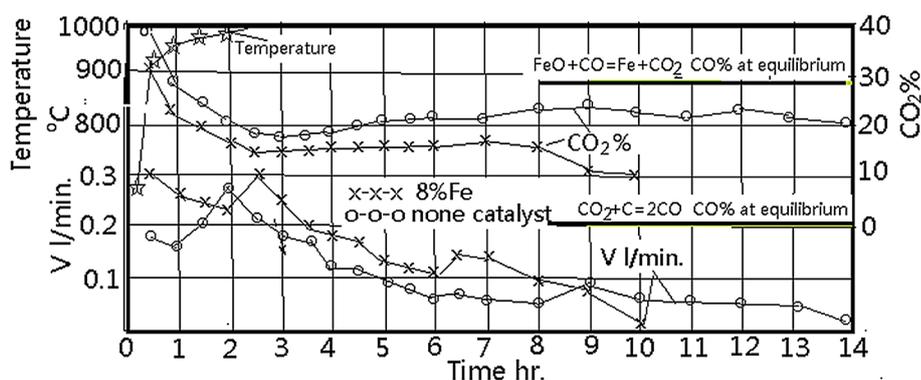


Figure 4. Fe catalytic activity  
图 4. Fe 的催化活性

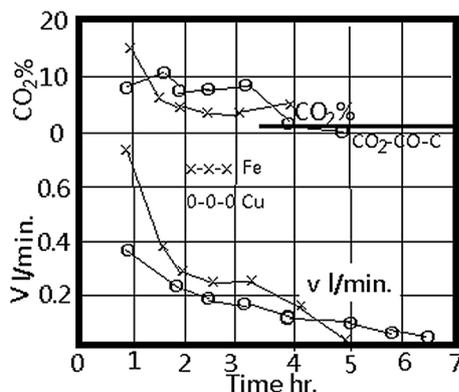


Figure 5. Fe-Cu catalytic activity  
图 5. Fe-Cu 催化活性

图 4 为 Fe 的催化活性。从煤气流速，煤气中二氧化碳含量以及海绵铁中碳的含量，一致地证明铁具有催化活性。图 5 为 Fe-Cu 的比较催化活性，结果表明铁的催化活性大于铜。

实验的结果：一是 Fe，Co，Ni，Cu，Ag 等都具有催化活性，铁的催化活性最大。在还原剂碳层内的 Fe，Co，Ni，Cu，Ag 等易还原元素不可能发生既还原、又氧化的化学反应，更不可能发生有学者认

为特殊的又氧化、又生成的循环反应。实验证明：催化剂不参加化学反应，文献中广泛流行的化学反应模式循环催化机理是错误的。二是 Cu 对碳气化反应具有催化活性，但是对铁基氨合成催化剂却具有毒性，因为在周期表中 Cu 处在 Fe 和 C 二元素之间，它的电负性值小于碳而大于 Fe。三是证明 S, SiO<sub>2</sub> 都是毒物，有力地证明催化剂与毒化剂之间存在一个分界线。这三个结果有力地证明电子循环授 - 受催化机理或电子轨道变形 - 回复循环催化机理是可靠的。

电子循环授 - 受催化机理或电子轨道变形 - 回复循环催化机理是一个基础理论，这个理论认为催化现象是物理现象而不是化学现象，催化剂不参加化学反应，仅仅是电子授 - 受或电子轨道变形 - 回复。电催化，光催化，微波催化，激光催化都是物理现象，选择催化与能级有关。生物酶选择催化同样与能级有关。

根据这个理论，作者多次撰文指出化工生产中存在许多不合理地方。由于基本理论存在问题，因此从理论到生产出现一片混乱局面。

双料盒实验是一个好方法，可以研究许多催化剂的催化活性，包括贵金属，过渡族元素，碱和碱土金属盐，稀土化合物等等。

上述两个实验都是在 70 年代完成的，当时主要是研究碳气化催化反应机理，意在探讨还原剂碳粉中加入催化剂提高还原速度，提高生产率。意想不到的是这个研究结果却不断地延伸到化工，冶金，电力，气候变化，能源，环保等多个领域。

两个实验结果明白地告诉人们，采用封闭式加热炉可以同时生产海绵铁和无氮型的高发热值煤气。技术简单，投资也很小，只要炉体或炉胆密封就可以了，海绵铁的生产成本自然下降。

#### 4. 利用石灰捕捉二氧化碳

目前，在全球范围内推广的 CCS 技术，捕捉二氧化碳的费用占全部费用 2/3。网上看到捕捉二氧化碳的方法很多，大多数处在研究阶段，主要目的是降低捕捉费用。但是，未见利用石灰捕捉二氧化碳的报道。

碳酸钙的分解反应是吸热反应，它的沸腾温度是 910°C。它的逆反应即捕捉二氧化碳反应是放热反应。



利用石灰捕捉烟气中的二氧化碳，有多个优点。自古以来，石灰作为建筑材料被广泛使用。它依靠吸收空气中的二氧化碳而变硬，达到固化目的，理论方面不存在问题。由于这个反应是放热反应，不需要供热，机械运转耗能又不多，因此认为这个方法可能是捕捉二氧化碳最经济的方法。石灰可以反复循环使用，捕捉效率要求不严，捕捉生成的石灰石可以永久贮存，而且没有地方限制，贮存和应用相结合就可以调节空气中二氧化碳含量，达到调控气候的目的。前几文中多次提出的控制一氧化碳贮存与应用相结合达到调控气候的目的，现在看来利用调节石灰石的贮量达到调节气候的目的更为合理可靠。

图 6 是石灰捕捉二氧化碳的流程图，唯一的设备是钢制滚筒，工作温度估计在 400°C~500°C 之间，滚筒结构大小决定于工厂二氧化碳的排放量，好在是对捕捉效率的要求没有严格的要求。

捕捉得到的石灰石在煅烧炉内分解，生成了石灰和二氧化碳。石灰可以循环使用，也可以作建筑材料。二氧化碳可以出售，因为柴禾塑料等垃圾处理需要大量的二氧化碳。作者多次撰文利用捕捉的二氧化碳拯救地球[6][7]，二氧化碳能消除白色污染，保护环境。当然也可以在煅烧炉内加碳直接生产无氮型高热值煤气，实现内循环。

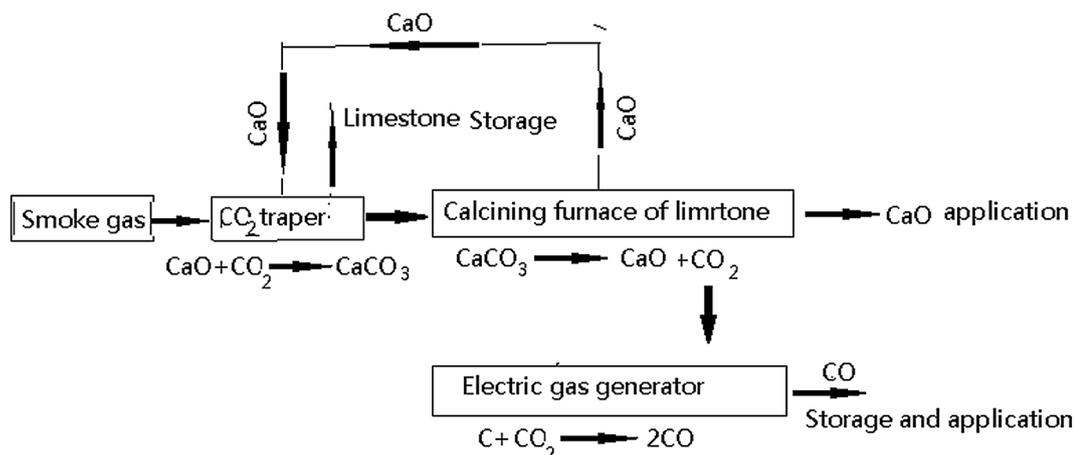
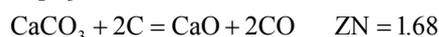
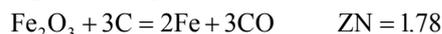


Figure 6. Flow chart of lime capture carbon dioxide  
图 6. 石灰捕捉二氧化碳流程图

## 5. 贮能指数与能耗

众所周知，化学反应有吸热反应和放热反应。作者把吸热反应称为贮能反应，把贮存的热值/吸收或消耗热值的比值标为贮能指数 ZN。下列几个反应都是贮能反应，它们的 ZN 值分别是：



贮能指数大于 1，意味着贮存的能量(CO 完全燃烧后放出的热量)大于化学反应时吸收或消耗的能量，当然这只是理论计算，而且是在标准状况下。但是，可以肯定氧化铁还原和石灰石分解与碳生成 CO 贮存的能量大于消耗的能量。如果循环使用，就可能会出现能量自给有余的结果，只消耗了还原剂和碳气化所需的碳，最终得到了既无煤耗又无能耗却能生产海绵铁的惊人结果，匪夷所思。但是，热化学数据是完全可靠的，况且这两个反应是古老的研究得很详细的反应。结果究竟如何，有待实验证明。

从网上可以查到，全球铁矿石的产量是 22.308 亿吨，按平均含铁 48.8% 计算，精铁矿的产量是 15.5 亿吨，其中氧的含量是 4.65 亿吨，还原燃烧生成二氧化碳为 6.4 亿吨。全球石灰石的耗量是 58 亿吨，其中二氧化碳含量为 25.52 亿吨，这两个工业生产排放的二氧化碳量总计达到 31.92 亿吨，如果再加上燃烧产生的二氧化碳，排放的二氧化碳就更多了，严重污染了环境。如果把 31.92 亿吨的二氧化碳加碳全部转化为一氧化碳，理论计算是 8.5 亿吨碳，需煤大约是 10 亿吨煤，我们就可以得到 31,920 亿立米的无氮型高热值煤气。全球 78 亿人口，每人年平均可以使用 409 立方米无氮型优质煤气。如果加上柴禾垃圾塑料动物尸体等生产的大量一氧化碳，也许足够人类生产活动所需要的能量。

我国水泥的产量占全球产量的 50%，钢铁的产量占全球的 53%，全球水泥钢铁生产时排放的 31.92 亿吨二氧化碳中有 16 亿吨是我国排放的。它可以生产 16,000 亿立方米无氮型高热值煤气，为俄罗斯输送到欧盟天然气北溪 2 号线的 29 倍，按我国 14 亿人口计算，每人每年可以使用 1143 立方米高热值煤气。目前的生产是全部以二氧化碳气体排放，宝贵的自然资源被白白抛弃了。

地面上日日夜夜在生长的动植物，实际是时刻在贮存能量。如果枯萎的大量动植物贮存的碳量能够满足生产煤气所需要的碳量，人们一直焦虑能源枯竭的问题也许就不存在了，人类再也没有必要毫无休止向地球索取能源。

根据贮能指数，海绵铁和石灰生产都可以实现无煤耗和无能耗生产。从充分利用自然资源，节约能源，减少二氧化碳排放等三个方面考虑，目前钢铁和水泥生产存在严重的不合理现象。人类既糟蹋了自然资源，又祸害了人类自己。

## 6. 炉型选择，技术与产品

前文已述，炉型可以多种多样，一个共同特点是炉体或炉腔必须密封，进出口俩端炉门也需封闭，以免大量煤气泄漏。如果采用炉胆密封，则可以用电，煤气或煤加热。

最简单的炉型应该是推杆式炉型，可大可小，仅仅炉胆需用 Fe-Cr-Al 耐热钢，进料端和出料端易于密封，投资小，结构简单，易于推广。目前大量使用的推杆式粉末冶金烧结电炉完全适用于同时生产海绵铁和无氮型煤气。如果把铁矿粉和煤粉加入适量粘结剂压成蜂窝或球状，反应速度可以很快。只要在料盒上方多加一点煤炭粉，就可以把还原气中 35%左右的二氧化碳转化为一氧化碳，结果得到相当于纯氧生产的煤气，从经济方面考虑也是非常合算的。

隧道窑应当是推杆式炉，既可以是外热式，也可以是内热式。外热式的可以采用煤气或煤加热，但炉胆必须用耐热钢。内热式的是炉体必须密封。

耗能最小或贮能指数较高的应该是高炉型和迴转炉，因为没有料盒，窑车等额外耗能装置。对于迴转炉，比较简单的是采用外热式，利用本身生产的煤气加热。

对于高炉型炉，可以是内热式，也可以是外热式。炉体或炉胆采用密封……高炉型炉的优点是占地小，无料盒，以及推送，迴转等能耗，担心的是顺行，采用矿粉和碳粉混合压成球状，虽然反应速度很快，但还原后海绵铁会膨胀，加之高温的铁具有粘性，易于在炉壁上结瘤，建造时必须充分留意。

对于石灰生产，有两个选择：一个选择是利用分解的二氧化碳，作为商品出售，因为利用垃圾等生产煤气，需要大量的二氧化碳作为生产的主要原料，二氧化碳是紧俏的商品；另一个选择是石灰石加煤炭直接生产无氮型的高热值一氧化碳，供自己或其它应用。

不管哪一种炉型，都可以生产低碳，中碳，高碳，Ni，Cu，Mo，W，Co 等合金海绵铁锭。

封闭型加热炉生产海绵铁的另一个优点是避免了还原后海绵铁的重氧化。如果目前使用的碳化硅罐改为 2 mm 厚 Fe-Cr-Al 焊接罐，既减少了反应罐重量，又减少了能耗，可以更好地避免海绵铁锭的重氧化，减少粉末冶金用铁粉二次还原的能耗和气耗。

## 7. 结束语

1) 火力发电厂是耗煤大户，也是大量排放二氧化碳的用户，估计其排放量是水泥钢铁企业产生的三倍以上，是必须捕捉二氧化碳的主要企业。

火力发电厂可以采用离心 - 重力方法或石灰捕捉二氧化碳两个分法。

目前的技术水平能够把  $U^{238}$  和  $U^{235}$  分离，把比重相差很大的二氧化碳和氮分离，应该不存在任何困难。况且对分离效率要求不严，只求稳定。

利用石灰捕捉二氧化碳，不需要供热，因为这个反应是放热反应。不得不提起的是太细的石灰粉存在爆炸的危险隐患。这个方法另有两个优点：一是石灰可以循环使用；二是石灰石可以到处永久贮存，没有危险隐患。

两个捕捉方法，简单又经济。但是，都要做少量简单的实验研究，确定有关结构和设计参数。

碳气化反应的贮能指数  $ZN = 3.52$ ，如果循环使用，可能出现自给有余的结果。

2) 柴禾塑料垃圾焚烧炉应该是大量排放二氧化碳的另一个大户。一吨 PE 或 PP 型塑料，根据结构式计算，完全燃烧后可以产生 3.14 吨二氧化碳(一吨碳完全燃烧后产生 3.67 吨二氧化碳)。但是与二氧化碳

反应后能够生产 4800 立米煤气。

垃圾焚烧炉生产煤气的原材料是二氧化碳和垃圾，二氧化碳可以从发电厂或石灰生产厂购买。

垃圾焚烧炉既是保护环境、消除白色污染的有力工具，变废为宝，经济效益又非常显著，因为反应的贮能指数 ZN 值预计大于 4。

3) 水泥，钢铁生产排放的二氧化碳数量约为全球总排放量 330 亿吨(2017 年)的 10%，几乎达到了联合国能源署要求年捕捉 34 亿吨二氧化碳的要求。可喜的是这两个生产项目捕捉二氧化碳非常简单，只要在石灰窑或还原反应罐中多加一点碳就可以了，碳的加入量可以根据化学反应式计算得到。

作者目前担心的是“过度捕捉”。造成“过度捕捉”的原因是技术易行，经济效益显著。尤其是推杆型电炉在农村普遍推广，过度捕捉的结果是植物枯萎，动物难以生存。科学家应当制定空气中二氧化碳含量标准。

这个技术的最大优势是各国政要非常重视气候变化。各国政府可以下令限制企业排放二氧化碳。如果电力、垃圾焚烧炉、水泥、钢铁、焚尸炉等 5 个生产单位不许排放二氧化碳，都必须改造成利用捕捉的二氧化碳生产无氮型的高热值煤气，人们担心的能源枯竭、环境污染、气候变暖等问题也许能得到圆满解决。

## 参考文献

- [1] 金家敏. 铁鳞还原过程的研究和提高铁粉产量、质量的措施[J]. 机械工程材料, 1977(3): 38-42.
- [2] 金家敏. 铁粉生产 10 年[Z]. 萧山: 中国华东区粉末冶金会议资料, 1977.
- [3] 金家敏. 还原铁粉生产的合理工艺流程[Z]. 上海粉末冶金厂资料室, 1980.
- [4] 金家敏. 江国源, 任家瑛 朱传征. (1982) 碳中矿物杂质对碳还原氧化铁过程的催化与毒化作用机理——电子循环授受助催化理论验证文章之一[C]. 昆明, 全国粉末冶金会议资料.
- [5] Jin, J.M. and Jiang, G.Y. (1988) The Diverse Effects of Various Mineral Impurities on the Carbon Gasification Reaction. *Proceedings of International Powder Metallurgy Conference*.
- [6] 金家敏. 利用捕捉的二氧化碳,煤炭和柴禾生产煤气——[利用捕捉的二氧化碳贮能减排]一文的补充[J]. 低碳经济, 2019, 8(4): 5.
- [7] Jin, J.M. (2020) Making use of CO<sub>2</sub> Capture for Saving Earth and Human—A Comparison of “Carbon Capture and Storage—CCS” and “Carbon Capture and Storage Energy—CCSE”. *Global Journal of Human-Social Science Research*, 20, 17-20. <https://doi.org/10.34257/GJHSSHVOL20IS2PG17>