

钢铁制造流程的本质、功能与钢厂未来发展模式

殷瑞钰

钢铁研究总院, 北京 100081

E-mail: cisri@cisri.com.cn

收稿日期: 2008-06-17; 接受日期: 2008-07-21

摘要 钢铁制造流程动态运行过程的物理本质是: 物质流(主要是铁素流)在能量流(主要是碳素流)的驱动-作用下, 按照设定的“程序”, 沿着“流程网络”作动态-有序的运行. 钢铁制造流程是一类开放的、非平衡的、不可逆的、由不同结构和功能的单元工序通过非线性耦合构成的复杂系统, 其动态运行过程的性质是耗散过程. 从钢铁制造流程动态运行过程的物理本质出发, 可以推出其功能应拓展为: (1) 铁素流运行的功能——钢铁产品制造功能; (2) 能量流运行的功能——能源转换功能以及与剩余能源相关的废弃物消纳-处理功能; (3) 铁素流-能量流相互作用过程的功能——实现过程工艺目标以及与此相应的废弃物消纳-处理功能. 钢厂未来发展模式将通过绿色制造和生态化转型, 逐步演化为都市周边环境友好型钢厂和港口生态工业带钢厂两类主要可选择的模式. 在未来循环经济社会中, 钢厂可能承担的社会经济职能是: (1) 钢厂是铁-煤化工的起点, 既要生产出更好、更廉价的钢, 又要充分利用能源; 大型钢铁联合企业应向“只买煤、不买电、不用燃料油”的方向发展, 同时也应该看到, 钢厂有可能制造出相对价廉的、大量的氢气; (2) 钢厂也可以是城市社会某些大宗废弃物的处理-消纳站和邻近社区居民生活热能供应站; (3) 钢厂可以是某些工业排放物质资源化循环、再能源化梯级利用和无害化处理的协调处理站. 钢厂可以通过延伸其制造链、经营链成为特定区域构筑循环经济社会的重要环节.

关键词

钢铁
制造流程
物理本质
功能
未来模式

钢铁是“必选材料”^[1], 是可循环利用的材料. 钢铁作为一种重要的结构材料及功能材料的位置, 在可预见的时间范围内不会发生重大变化.

钢铁工业属于流程制造业. 它是由功能不同的制造工序(装置)通过组合-集成构建起来的. 从工程系统看, 经过一个半世纪以来的演变, 现代钢铁企业的制造流程已演变两类基本流程(图 1):

1) 以铁矿石、煤炭等天然资源为源头的高炉-转炉-热轧-深加工流程和熔融还原-转炉-热轧-深加工流程. 这是包含了原料和能源储运/处理、烧结-焦化-炼铁过程(熔融还原)、炼钢-精炼-凝固过程、再加热-热轧过程及冷轧-表面处理过程的生产流程;

2) 以废钢为再生资源 and 电力为能源的电炉-精炼-连铸-热轧流程. 这是以社会循环废钢、加工制造废钢、钢厂自产废钢和电力为源头的制造流程, 即所谓电炉流程.

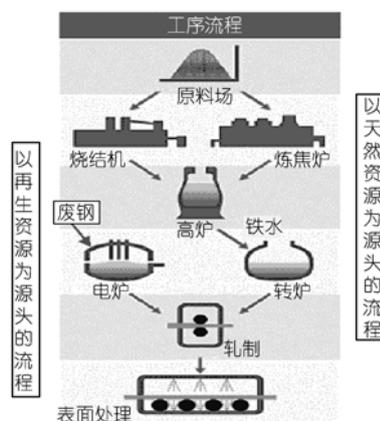


图 1 两类钢铁制造流程示意图

从物理角度上看, 钢铁企业的生产过程实质上是物质、能量以及相应信息的流动/流变过程. 其动态运行过程的物理本质是: 物质流(主要是铁素流)在能量流(主要是碳素流)的驱动和作用下, 按照设定的“程序”, 沿着特定的“流程网络”作动态-有序的运行. 从热力学角度上看: 钢铁制造流程是一类开放的、非平衡的、不可逆的、由不同结构-功能的单元工序通过非线性耦合所构成的复杂系统^[2], 其动态运行过程的性质是耗散过程.

在钢厂生产过程中, 铁素物质流是一类多因子流, 是被加工的主体. 碳素能量流则作为驱动力、化学反应介质或热介质按照工艺要求对物质流进行加工、处理, 使其发生位移、化学/物理转换, 实现以制造过程中物质、能量“耗散最小化”为核心的多目标优化. 例如生产效率高、产品质量优、能源消耗低、过程排放少、生产成本低、环境/生态友好等.

从钢铁制造流程动态运行过程的物理本质出发, 可以推出其功能应拓展为:

- 1) 铁素流运行的功能——钢铁产品制造功能;
- 2) 能量流运行的功能——能源转换功能以及与剩余能源相关的废弃物消纳-处理功能;
- 3) 铁素流-能量流相互作用过程的功能——实现过程工艺目标以及与此相应的废弃物消纳-处理功能.

钢铁工业的未来发展, 应该在充分理解钢铁制造流程动态运行过程物理本质的基础上, 进一步拓展钢厂的功能, 以新的模式实现生态化转型, 融入循环经济社会.

1 钢铁产品制造功能

钢铁产品制造功能是建立钢厂的初衷和基本出发点, 在未来发展过程中, 既要考虑市场竞争力, 同时又必须重视可持续发展能力, 对于新一代钢厂的产品制造功能, 应该从如下视角出发来思考技术进步的战略性问题:

- 1) 以过程耗散“最小化”为核心目标, 建立动态-有序、连续-紧凑的新一代钢铁制造流程;
- 2) 以过程冶金的解析-集成优化为原则, 建立起针对不同产品的高效率、低成本“洁净钢平台”;
- 3) 以材料工程为指导, 规范不同钢铁产品的合理性能并实现产品换代.

2 能源转换功能以及相关的废弃物消纳-处理功能:

钢铁制造流程的物理本质和运行特征可以进一步具体表述为: 由各种物料组成的物质流在输入能量的驱动和作用下, 按照设定的工艺流程, 使铁素物质流发生状态、形状和性质等一系列变化, 成为期望的产品. 在这过程中, 物质流和能量流时而分离、时而相伴. 相伴时, 相互作用、影响; 分离时, 又分别表现各自的行为特征.

2.1 物质流与能量流的关系

深入分析研究一下钢铁制造流程中物质流与能量流的行为和关系是有必要的. 总的看来: 在钢厂生产流程中, 能量流与物质流是时合时分的(图 2 ~ 4).

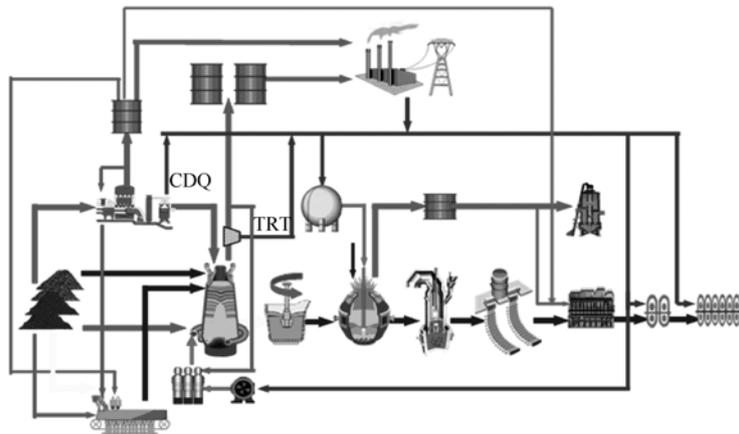


图 2 典型钢铁企业物质流及能量流运行的轨迹

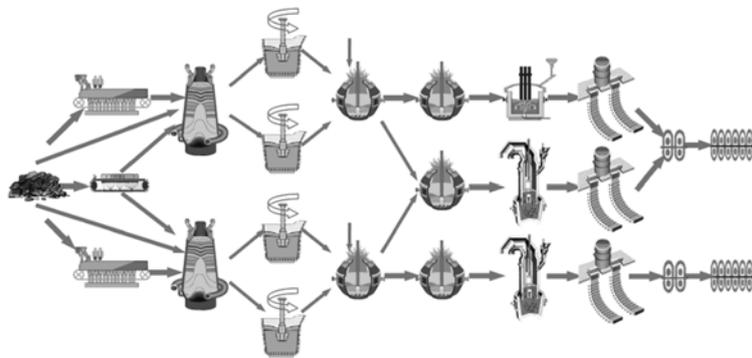


图 3 曹妃甸钢铁厂物质流(铁素流)运行轨迹与网络

分析图 2 ~ 4, 不难看出如下特点.

- 1) 从企业生产流程整体上看, 物质流与能量流是相互关联的. 但是, 从物质流、能量流的运行轨迹看是时合时分的, 并可以分别形成“物质流网络”和“能量流网络”, 两者并不完全重合;
- 2) 从局部的工序/装置看, 在输入端, 物质流和能量流分别输入; 在装置内部, 物质流

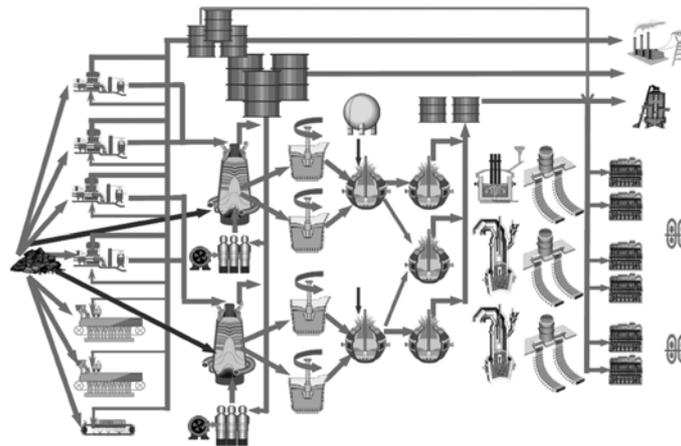


图4 曹妃甸钢铁厂能量流(碳素流)运行轨迹与网络

与能量流相互作用、相互影响；在输出端，往往表现为物质流带着部分能量输出，同时还有不同形式的二次能量流分别输出。这是因为在工序/装置中，有必要的过剩能量，才能保证工艺、加工过程中的效率，因此有剩余能量流输出是不可避免的。例如：在高炉炼铁过程中，在输入端，烧结(球团)矿和焦炭、煤粉、鼓风是分离的(物质流和能量流分离)；在高炉内部，烧结(球团)矿和焦炭、煤粉、鼓风相互作用、相互影响，发生燃烧升温、还原反应、成渣脱硫、铁液增碳等反应，完成了液态生铁的生产过程；在输出端，液态生铁和液态炉渣等物质流承载着大部分的能量输出，与此同时大量的高炉煤气带着动能、热能和化学能输出，仍然保持着能量流的形式。同样：在烧结过程、焦化过程、炼钢过程、轧钢加热炉过程也有相似的现象(见图5~8)。因此，人们不仅要注意输入端的能量流行为，而且也必须注意输出端的能量流行为。

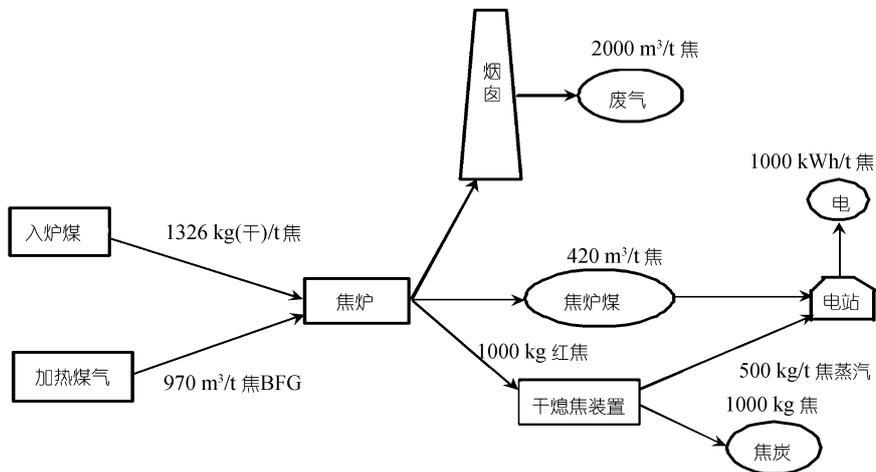


图5 焦化系统的物料与能源利用框图

入炉煤的成焦率按 75.4% 计，即 1326 kg 干煤生产 1 吨焦炭；加热焦炉用的高炉煤气发热量为 1000 kcal/m³；干煤的相当耗热量为 728 kcal/kg

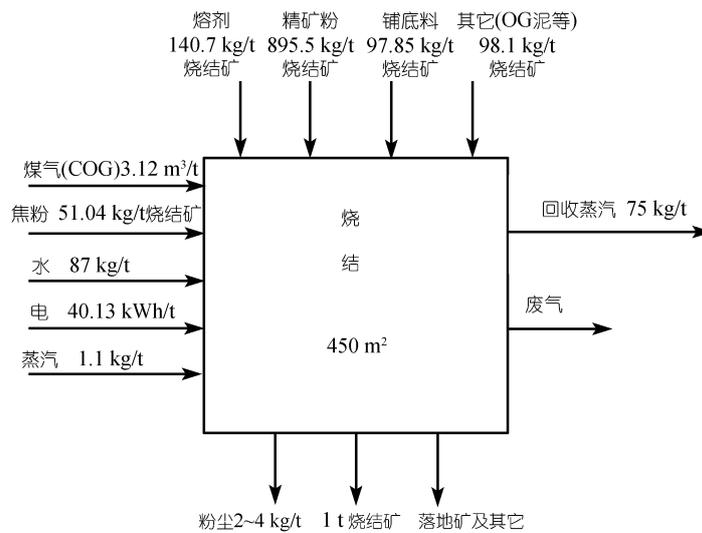


图 6 烧结系统的物料与能源利用框图

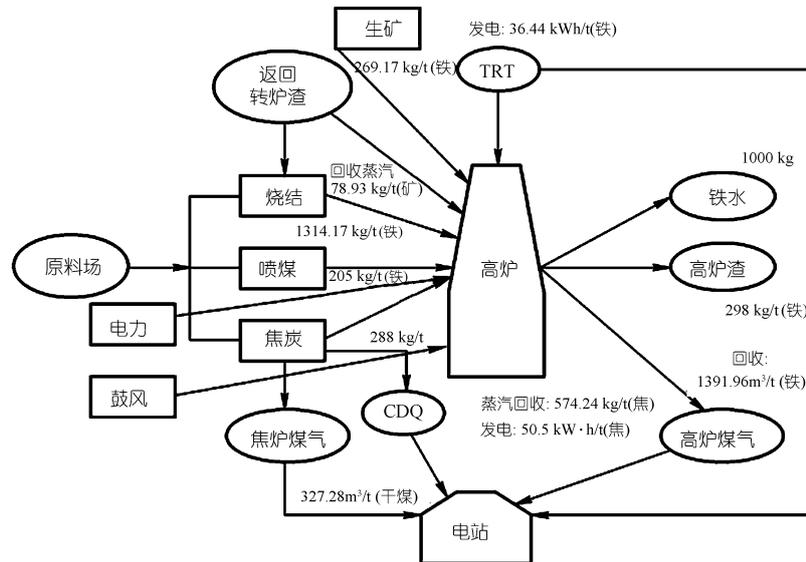


图 7 高炉炼铁系统的物料与能源利用框图

2.2 能量流转换功能和“能量流网络”

在研究钢铁制造流程的能量转换功能时,也应该建立起与能量相对应的“流”、“能源转换程序”和与之相关的“能源转换网络”的动态-有序、输入-输出概念;其中包括了有关钢厂能量流运行的时间-空间-信息概念,而不能局限在质-能衡算的概念上。现在,国际顶级的高炉-转炉-热轧生产流程也还有 38%左右的能源未被铁素物质流充分利用,为了充分利用钢厂生产过程输入的一次能源和能源转换过程中产生的二次能源,应该作如下通盘思考:

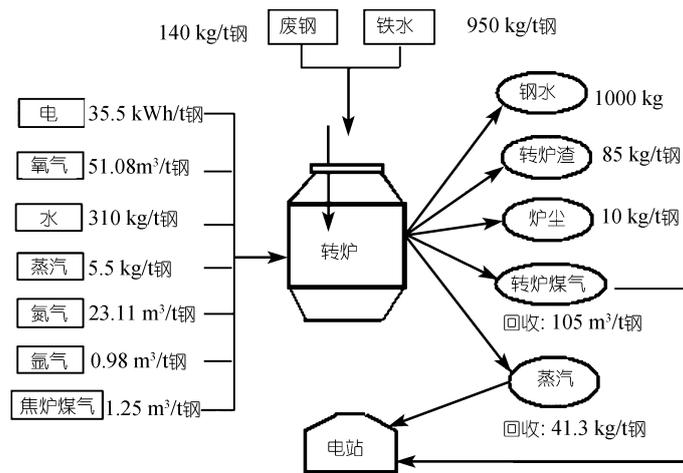


图 8 转炉炼钢系统的物料与能源利用

- 以输入-输出的模型研究钢厂能量流与物质流的关系，以及其中能量流的行为；
- 以功能-效率为目标，研究一次能源、二次能源使用顺序；
- 以连续实时调控和近“零”排放为目标，以图论等方法手段，研发钢厂“能源转换网络”（“能量流网络”）；
- 开发有关铁素物质流运行过程中的节能减排技术；
- 研究二次能源充分利用条件下不同钢铁制造流程的极限能耗量值；
- 研究钢铁制造流程的结构与吨钢CO₂排放的关系……

3 实现过程工艺目标以及相应的废弃物消纳-处理功能

从钢铁生产过程中物质流和能量流的运行看，都会产生副产品、废弃物、余热、余能等物质、能量的排放，这些排放过程及排放物构成了对环境、生态的不良影响。纵观国际动态，钢铁工业应对环境-生态的对策，大体上经历了的过程如图9所示。

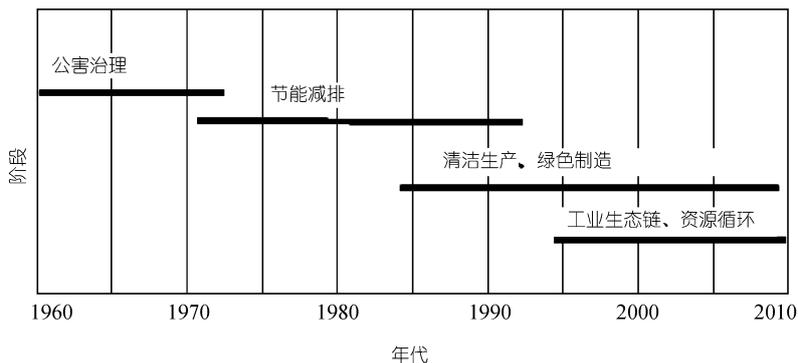


图 9 钢铁工业环境保护的发展进程示意图^[3]

由图 9 可知, 在 20 世纪 60~70 年代主要是被动地采取末端治理的方法来消除或减轻污染公害. 继而在 70~90 年代转向节能减排为主的积极对策, 减少排放、减少污染并降低成本. 到 80 年代后期至 90 年代进一步上升到清洁生产过程和绿色制造的阶段, 清洁生产是指将整体的、预防的环境战略持续地应用于生产过程中, 绿色制造的内涵比清洁生产的内容更宽泛些, 它还包括了提高产品使用效率或使用寿命等. 20 世纪 90 年代后期进入研究钢厂生态化转型和构想融入循环经济社会阶段. 旨在将钢铁企业与相关的生产过程、社会消费过程和废弃过程、分解-回收-循环利用过程组成生态工业链, 这是钢铁工业生态化转型并融入循环经济社会的重要构成和标志(图 10).

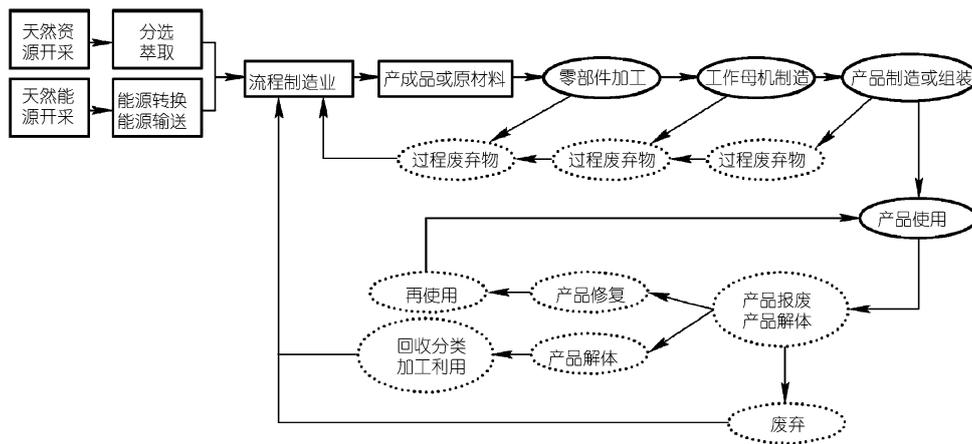


图 10 流程制造业与循环经济的关联^[2]

在钢铁制造流程的物质流运行、能量流运行的物质流-能量流相互作用过程中, 存在着消纳-处理废弃物并使之资源化、能源化的可能性. 例如: 在物质流运行过程中消纳废钢, 处理烟尘、铁鳞等含铁废弃物, 回收利用 Cr, Ni, Cu, Zn 等金属; 在能量流的运行过程中消纳-处理废塑料、废轮胎、处理社区污水、处理垃圾甚至大量制氢等; 在延伸生态-工业链的过程中与水泥、建材、发电等产业链接.

在未来发展循环经济的过程中, 钢厂生产过程应是重要切入点之一, 因为钢厂具有如下特点:

- 1) 资源密集、能源密集: 在钢铁联合企业内, 每吨钢将消耗 0.6~0.8 吨标准煤、1.50~1.55 吨铁矿石、80~150 公斤废钢、3~6 t 新水. 由此形成了大量的物质、能量的输入与输出;
- 2) 生产规模大、物流吞吐大: 现代化钢厂的基本级别已经大致地分为年产钢 800~1000 万吨, 600~800 万吨, 300~400 万吨及 100~200 万吨等级别; 由此伴随着巨大的运输物流和资金流;
- 3) 钢铁制造流程工序多、结构复杂, 由此可形成若干产业链接关系;
- 4) 钢铁制造流程中伴随着大量物质和能量排放, 并形成了复杂的环境界面, 其中蕴含着大量的“减量化、再利用、再循环”的机会.

4 钢厂副产煤气制氢

高炉-转炉流程是铁-煤化工过程,是将煤炭通过冶金流程转换为热能、电能、可燃气、蒸汽等能源的过程.值得重视的是由钢铁制造流程可以开发出大量新一代清洁能源—氢气,例如通过吸附制氢的方法从焦炉煤气中得到氢;通过CO-H₂O反应,从高浓度CO的转炉煤气中得到氢,也可以从熔融还原炉富CO、富H₂的尾气中得到氢;进而还可以进一步加工成二甲醚(CH₃OCH₃)作为液态能源.

4.1 焦炉煤气制氢^[4]

工业制氢目前是以天然气、石油和煤为原料,在高温下使之与水蒸气反应或用部分氧化法制得^[5](图 11).而钢铁企业(或炼焦厂)产生的焦炉煤气含有 50%~60%的H₂,是非常好的制氢原料气(表 1).目前钢厂主要还是将焦炉煤气用做燃料,看来,焦炉煤气利用的合理途径需引起重视,应该尽可能少地将焦炉煤气作为燃料来使用.



图 11 天然气制氢工艺技术路线^[5]

表 1 焦炉煤气与天然气成分/%

成分	H ₂	CH ₄	CO	C _m H _n	CO ₂	N ₂	O ₂
焦炉煤气	55~60	23~27	5~8	2~4	1.5~3	3~7	0.3~0.8
气井	-	98.0	-	0.6~1.0	-	1.0	-
油井	-	81.7	-	10~15	0.7	1.8	0.2

采用焦炉煤气制氢,只需按现有煤气处理工艺,将其中的有害杂质去除,即可通过变压吸附技术提取出高纯度(99.99%)的氢气(图 12)^[6],按此流程 1 m³的焦炉煤气可制取约 0.44 m³的氢.与天然气制氢相比,省去了蒸汽转换或部分氧化等CH₄裂解过程,从而省去了这一工艺过程的能源消耗.比直接使用较贵的天然气和煤炭等制氢更加经济,是大规模、高效、低成本地生产廉价氢气值得探索的途径.

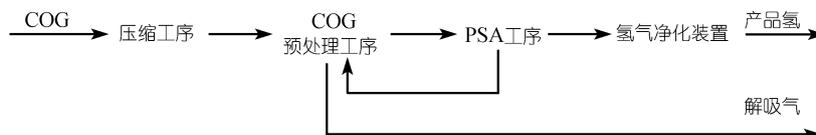


图 12 焦炉煤气(COG)制氢的工艺流程框图^[6]

目前,焦炉煤气变压吸附制氢技术在装置规模为 1000~3000 m³/h左右是成熟的,大规模制氢装置(如 10000 m³/h级以上)尚有待进一步开发.

4.2 钢厂其他煤气制氢^[4]

钢厂转炉煤气和COREX煤气成分, 均富含CO甚至富含H₂(表 2), 其制氢工艺可以通过水煤气变换反应, 生成富H₂的合成气.

表 2 转炉煤气、COREX 煤气成分/%

	H ₂	CO	CO ₂	N ₂	O ₂
转炉煤气	0.5~3	60~80	10~20		0~1
COREX 煤气	10~30	48~80	5~30	<5	

(1) 转炉煤气制氢. 转炉炼钢系统产生的煤气经降温、除尘后, 进入水煤气变换装置中, 在催化剂的作用下, 发生水煤气变换反应. 反应后, 经冷却、分离, 获得富含氢气的混合气体. 混合气体经脱硫后, 采用变压吸附制氢法, 获得高纯度氢气.

(2) COREX煤气制氢. 熔融还原炉(COREX)以铁矿和煤炭为原料, 在生产铁水过程的同时, 发生大量富含CO和H₂的COREX煤气. 在工业条件下, 其制氢过程以及相应其物料平衡大致如图 13 及表 3 所示:

表 3 物料平衡表(以下物料对应 118 吨铁/h, 即: 110%负荷)

物料名称	COREX 气(1)		变换气(2)		VPSA 原料气(3)		VPSA 产品气(4)	
	Nm ³ /h	mol%	Nm ³ /h	mol%	Nm ³ /h	mol%	Nm ³ /h	mol%
CO ₂	35939	28.86	85981	49.5	85981	28.58	/	/
CO	55714	44.74	5541	3.19	5731	1.91	190	0.1
CH ₄	1980	1.59	1980	1.14	2550	0.85	570	0.3
H ₂	25005	20.08	75611	43.53	200190	66.55	188179	99
N ₂	4570	3.67	4586	2.64	6368	2.12	1141	0.6
H ₂ O	1320	1.06	/	饱和	饱和			/
合计	124528	100	173699	100	300820	100	190080	100
压力/MPa	0.6		0.55		0.55		0.5	

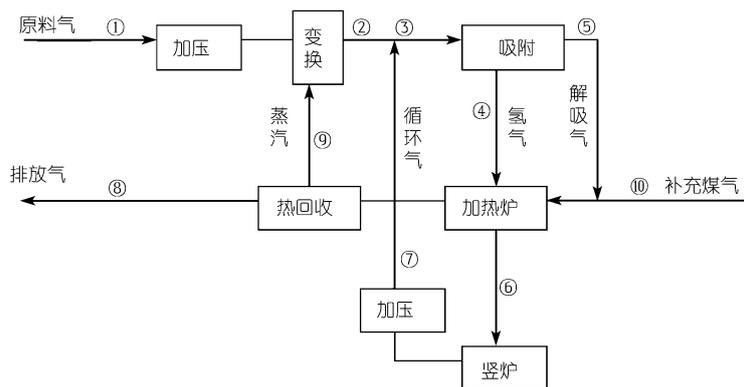


图 13 COREX 煤气制氢流程框图

5 循环经济的有效实施——从“3R”原则到“五要素(5E)集成”

实施循环经济应该以 3R 为原则, 实现资源、能源的最有效利用, 降低环境负荷, 其目的是促进经济、社会的可持续发展. 应该指出: 所谓“3R”只是原则, 不是实现循环经济过程中的全部要素. 因为实施循环经济是有循环成本的, 有资金流动增值内涵的. 实施循环经济需要技术(及技术开发)、需要投资、还有运行成本; 实施循环经济的主体是各种不同类型的经济单元(企业), 企业的存在离不开资金流动, 因此, 实施循环经济也是建立在资金流动并实现增值基础上的. 实施循环经济不仅要注意成本、资金要素, 而且还必须注意物质、能量循环利用在时间和空间配置上的可能性和合理性. 在各类循环过程中, 物质、能量的有效利用不能脱离时间、空间要素, 没有时间、空间概念的循环过程是难以想象的. 从而可以看出, 实施循环经济是以“3R”为基本原则, 并在一定条件下将物质、能量、时间、空间、资金等“五要素”有效地整合在一起以实现经济效益、社会效益和环境效益协同发展的经济模式(图 14)^[4]. 一个著名的案例就是丹麦卡伦堡生态工业园区(图 15), 其中不仅包括了物质、能量循环利用, 而且体现了较为合理的空间-时间尺度以及资金的增值过程.

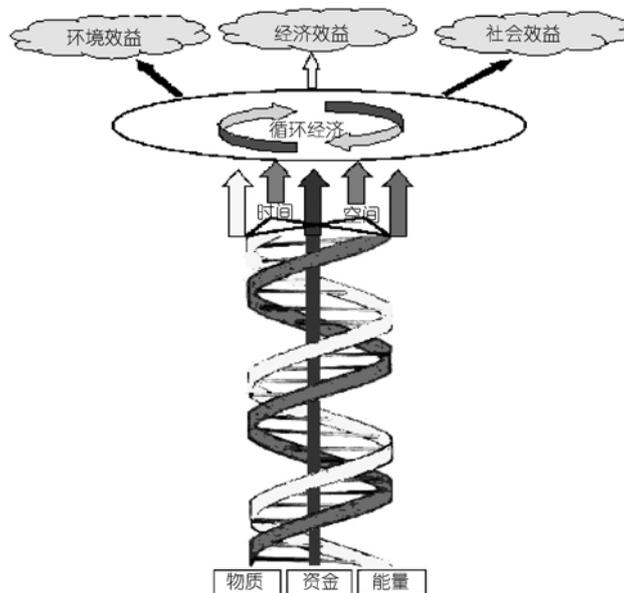


图 14 从“3R”出发到“五要素”优化集成——有效地实施循环经济^[4]

6 实施循环经济过程中技术-经济因素的协调

在不同条件下, 循环经济的实施有赖于以下技术-经济因素的协调:

- 1) 物质/能源(包括排放物、废弃物等)循环链的延伸、扩展及其转换/利用效率的合理性;
- 2) 物质/能源循环通量的大小, 必须具有一定的循环通量, 才能具有可行性;
- 3) 物质/能量在循环过程中的经济合理性(流动-循环的成本等);
- 4) 物质/能量在循环过程中时间-空间因素的集成性(流动-循环的可行性和稳定性等).

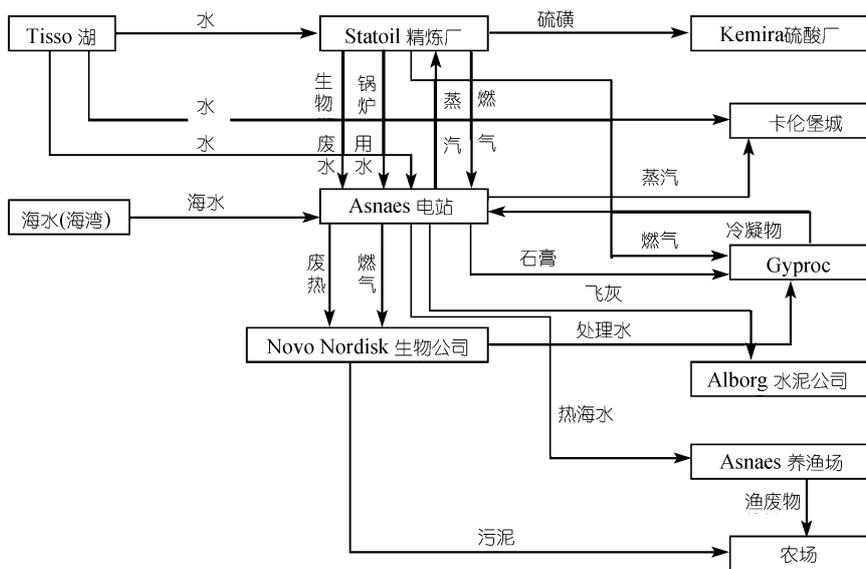


图 15 卡伦堡生态工业园示意图

推行循环经济要根据上述诸因素，充分论证其技术-经济可行性，并择易先行，择优先行。可见，钢厂的生态化转型与发展循环经济关系密切，钢厂应是发展循环经济的优先切入点之一。

7 未来生态化钢厂的发展模式

从钢铁工业生态化和发展循环经济的理念出发，钢厂未来发展模式将通过绿色制造向生态化转型，逐步形成都市周边环境友好型钢厂(图 16)和港口生态工业带钢厂(图 17)两种主要的可选择的模式。

(1) 都市周边环境友好型钢厂

由于工业生态链的构成，铁素资源会成为循环经济中的重要一环。在若干有条件的城市

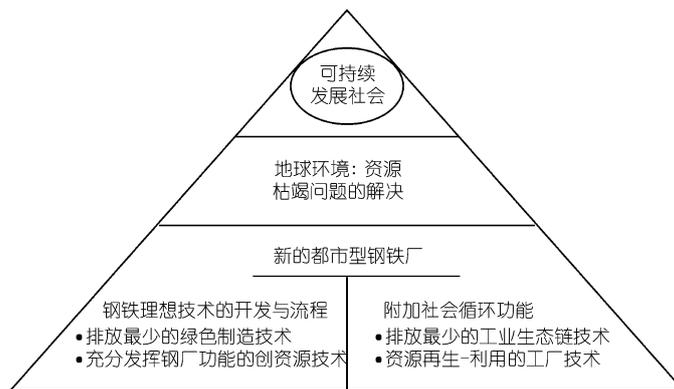


图 16 都市周边环境友好型钢铁厂的发展理念^[2]

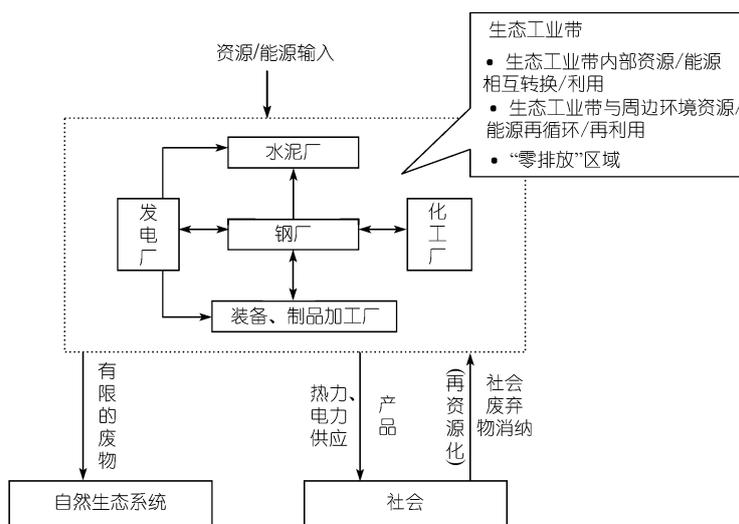


图 17 港口生态工业带钢厂示意图^[2]

周围，特别是大城市周边的钢厂应该融入循环经济社会，逐步实施生态化转型，这类钢厂有着诸多有利条件和经济-生态价值。城市中产生的废钢、废塑料、废轮胎、垃圾等大量废弃物可以由钢厂就近处理并有效地利用。同时，钢厂的社会经济职能也可以通过生态化转型而得到进一步扩展。钢厂除了供给城市及其周边地区所需的钢材以外，还可以向社区居民供应热水乃至部分电力等(见图 16)。

(2) 港口生态工业带钢厂

由于全球经济一体化进程的加速，大宗矿物资源和能源的国际贸易进一步扩大。如：2006 年全球铁矿石的出口量已到 7.8 亿吨，2006 年我国铁矿石进口量已达 3.26 亿吨，2007 年则为 3.83 亿吨。促进了港口生态型大型钢铁联合企业的发展，并将引起某些综合条件优良的港口城市逐步发展为生态工业带。在这种条件下，大型钢铁联合企业可以凭借自己的物质流优势、能量流优势、资金优势、技术优势、人才优势，扩展其制造链、经营链。钢厂可以成为循环经济的核 心，发展钢-电-水泥联产的工业生态链，可以与石化工业、造船工业、集装箱制造业等形成产业链。同时，大型钢铁联合企业产生的富一氧化碳(转炉煤气)、富氢煤气(焦炉煤气)，经过开发，有可能得到大量的氢，这些氢如果与相邻的石油化工企业链接，亦可增加石化企业的竞争力。在这类生态工业带内，资源、能源、资金可得到充分有效的利用，单位产值的环境负荷得以削减，可以认为这是一种重化工型的生态工业带(见图 17, 18)。

在循环经济社会中，生态化钢厂可能承担以下社会经济职能。

(1) 钢厂是铁-煤化工的起点，既要生产出更好、更廉价的钢，又要充分利用能源；大型联合钢铁企业应向“只买煤、不买电、不用燃料油”的方向发展，同时也应该看到，钢厂有可能制造出相对价廉的、大量的氢气；

(2) 钢厂也可以是城市社会某些大宗废弃物的处理-消纳站和邻近社区居民生活热能供应站；

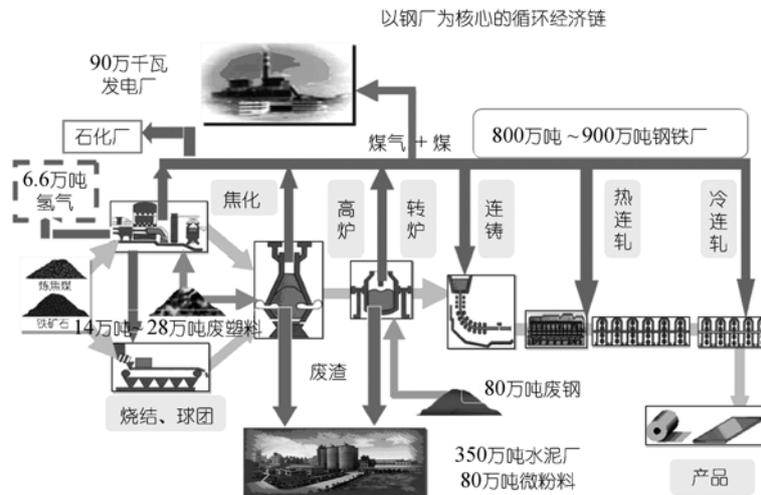


图 18 钢铁联合企业的制造流程及其相关产业链^[4]

(3) 钢厂可以是某些工业排放物质资源化循环、再资源化梯级利用和无害化处理的协调处理站. 钢厂可以通过延伸其制造链、经营链成为特定区域构筑循环经济社会的重要环节.

8 结语

1) 钢铁制造流程是一类开放的、非平衡的、不可逆的、由不同结构-功能单元工序通过非线性耦合构成的复杂系统.

2) 流程动态运行的物理本质是: 物质流(主要是铁素流)在能量流(主要是碳素流)的驱动、作用下, 按照设定的“程序”沿着“流程网络”做动态-有序运行, 属于耗散过程.

3) 钢铁制造流程的功能应拓展为: 钢铁产品制造功能、能源转换功能、废弃物消纳-处理和再资源化功能.

4) 未来钢厂的模式, 应从生态化转型和发展循环经济的理念出发, 逐步形成都市周边环境友好型钢厂和港口生态工业带钢厂两种主要模式.

参考文献

- 1 卡瓦纳 L, 韩静涛, 王服明等译: 钢铁工业技术开发指南 北京: 科学出版社, 1998
- 2 殷瑞钰. 冶金流程工程学. 北京: 冶金工业出版社, 2004. 97, 364, 392—394
- 3 殷瑞钰, 张寿荣, 陆钟武, 等. 绿色制造与钢铁工业. 中国工程院咨询项目报告. 2002. 10—11
- 4 殷瑞钰, 陆钟武, 张春霞, 等. 钢铁工业生态化模式及其管理和评价体系. 国家自然科学基金资助项目结题报告. 北京: 国家自然科学基金重要委员会, 2007. 13, 25
- 5 彭奕, 李淑芳. 工业制氢方案的分析和探讨. 化工设计, 2003, 13(4): 7—12
- 6 王岩. 焦炉煤气变压吸附制氢工艺的应用. 鞍钢技术. 2000, (2): 42—45