

# 循环型过程工业设计 ——框架、策略与案例研究

李会泉 齐涛 郑诗礼 徐红彬 李佐虎 张懿  
(中国科学院过程工程研究所绿色过程工程实验室,北京 100080)

**摘要:**依据可持续发展理论,提出了以绿色化学、绿色过程工程与工业生态为技术支撑的循环型过程工业系统设计的框架与策略,用以开发过程工业清洁生产-循环经济运行新模式,综合解决资源-环境-经济问题。所提出的设计方法应用于铬盐清洁生产工业生态系统的构建,实现了环境-经济双赢目标。

**关键词:**循环经济;过程工业;层次模型;工业生态;清洁工艺

**中图分类号:**TQ021.8

**文献标识码:**A

**文章编号:**0253-4320(2004)S2-0111-03

## Design for system of recycling process industry: A study on framework, strategy and case

LI Hui-quan, QI Tao, ZHENG Shi-li, XU Hong-bin, LI Zuo-hu, ZHANG Yi

(Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

**Abstract:** Based on sustainable development theory, a hierarchical framework and the strategies, on the technical base of green chemistry, green engineering and industrial ecology, were developed, which could be used to design a cleaner and closed-loop manufacturing model replacing the existing industrial process which produces high pollution. The present methodology succeeds in structuring an industrial ecosystem used in a cleaner process for chromate production, and can achieve both economic and environmental benefit.

**Key words:** recycling economy; process industry; hierarchical model; industrial ecology; cleaner process

过程工业涉及资源的大规模化学与物理转化,是造成不可持续发展危机的罪魁祸首之一。实现过程工业清洁生产,发展循环型过程工业系统是建立循环型社会的技术基础与核心。“3R”原则即“减量化、再利用、再循环”(Reduce, Reuse, Recycle)是实现循环型过程工业系统的最重要实际操作原则<sup>[1]</sup>。对于过程工业,减量化原则旨在尽可能减少进入生产过程中的物质流与能量流,实现源头减污。绿色化学从源头减少对人类健康和资源环境有害物质的使用,是过程工业减量化原则的主要实现技术<sup>[2]</sup>。过程工业的再利用原则目的是延长生产过程资源利用的时间长度,实现物质流与能量流的高效清洁运行。绿色过程工程面向生产过程的设计、实施与运行,采用非常规介质、清洁催化、过程强化、系统集成等技术实现再利用原则<sup>[3-4]</sup>。再循环原则要求把过程工业的废弃物再资源化以减少末端处理量。工业生态化是再循环原则的技术实现<sup>[5]</sup>,它追求系统内各生

产过程从原料、中间产物、废物到产品的物质循环,更是循环型过程工业系统的具体表现。绿色化学、绿色过程工程、生态工业是建立过程工业可持续发展体系的技术支撑。笔者从过程系统工程(PSE)角度出发,针对循环型过程工业系统的发展,探讨将三者纳入一个统一的层次模型设计框架中。并应用于铬盐清洁生产工业生态系统的开发,重点阐述了新工艺的绿色化学反应体系和系统物质流与能量流共生网络结构。

## 1 设计框架与集成策略

### 1.1 设计框架

从 PSE 角度出发,发展循环型过程工业系统是一个多尺度、多层次的设计行为<sup>[6]</sup>。笔者提出了如图 1 所示的基于生命周期的层次模型设计框架。

绿色化学处于层次模型的最内层,创新源头减污的新工艺;绿色过程工程衔接新工艺,发展成为一

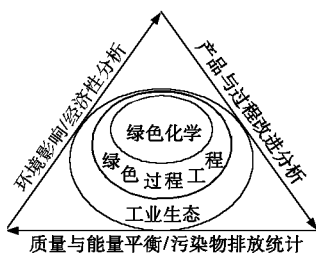


图 1 基于生命周期的层次模型设计框架

个物质流、能量流与信息流高效清洁运行的工业过程；生态工业层次则将新过程“粘合”进入现有产业

链,构架资源循环的生态工业系统。模型的最外层是生命周期工程,包括污染物排放统计、环境影响/经济性分析、产品与过程改进分析 3 个相互衔接的过程。生命周期工程贯穿于循环型过程工业系统设计的全过程,按顶层分析原则,指导不同设计阶段的工艺与过程的经济-环境权衡。

1.2 应用策略

图 2 尝试给出从绿色化学到生态工业的循环型过程工业系统设计应用策略。

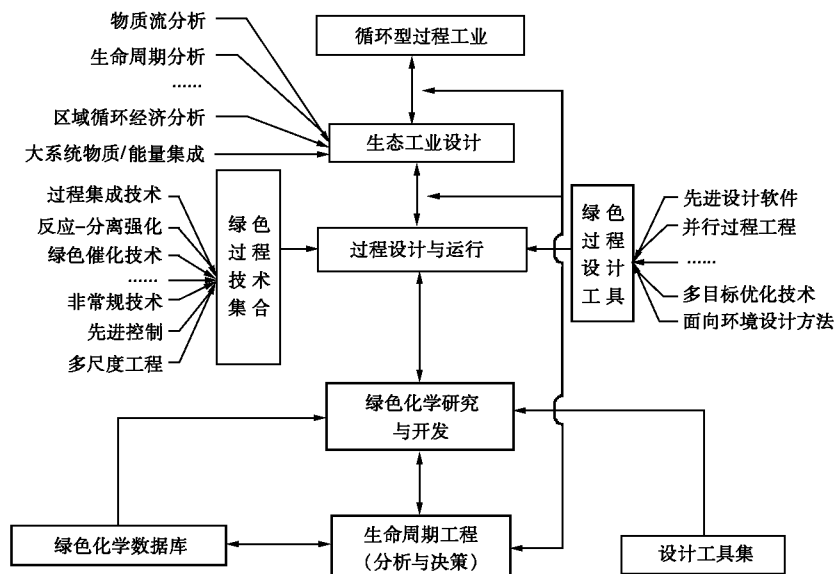


图 2 循环型过程工业系统设计应用策略

所提出的设计框架与策略已应用于铬盐清洁生产生态工业系统发展中。铬盐工业为无机化工与冶金材料交叉的重点行业,我国铬化工现行生产工艺仍沿袭 20 世纪 50 年代的高温氧化焙烧-硫酸酸化产品转化传统工艺,是一个重污染行业。采用绿色化学与工程技术,从源头减污出发,实现铬盐的清洁生产-循环型过程工业运行新模式意义重大。

2 案例研究——铬盐清洁生产生态工业系统

2.1 绿色化学新工艺

中国科学院过程工程研究所以铬化工重污染行业为切入点,运用绿色化学与工程原理,开创了低温亚熔盐连续液相氧化-反应/结晶分离耦合-介质再生循环-资源全组分深度综合利用的铬化工绿色化学清洁工艺<sup>[7]</sup>。该清洁工艺与传统工艺的指标对比见表 1。

清洁工艺原子利用率达到 88.5%,而传统工艺只有 14.7%。应用于钾碱体系的清洁工艺主要包

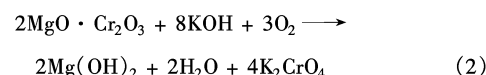
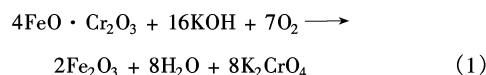
括如下反应:

表 1 清洁工艺与传统工艺的指标对比

项目	清洁工艺	传统工艺
反应温度/℃	300	1200
Cr 回收率/%	99	76
铬渣生成量 <sup>①</sup> /t	0.5	2.5
铬渣中总铬质量分数/%	0.50	3.0
含铬芒硝生成量 <sup>②</sup> /t	0	0.5

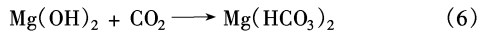
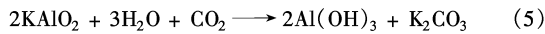
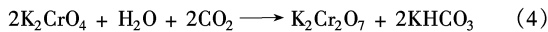
注:①、②是指每吨产品中含铬渣、芒硝的质量,其中铬渣为水泥行业合格的生产原料。

(1) 亚熔盐拟均相非常规介质反应系统



(2) CO<sub>2</sub> 工业废气实现产品清洁转化与再生循

环



## 2.2 物质流共生网络

铬化工清洁生产新工艺已经在河南省义马市工业园区建成了万吨级示范工程<sup>[5]</sup>。该工业区内建有日产煤气120万m<sup>3</sup>、联产甲醇14万t/a的气化厂,20万t/a的水泥厂。从清洁工艺体系反应链的原子交换出发,采用物质集成与能量集成技术,依托已有企业与铬盐示范工程,建成了如图3所示的生态工业系统(3万t/a钾碱厂、5000t/a高级材料厂,5万t中水处理厂为新建项目)。

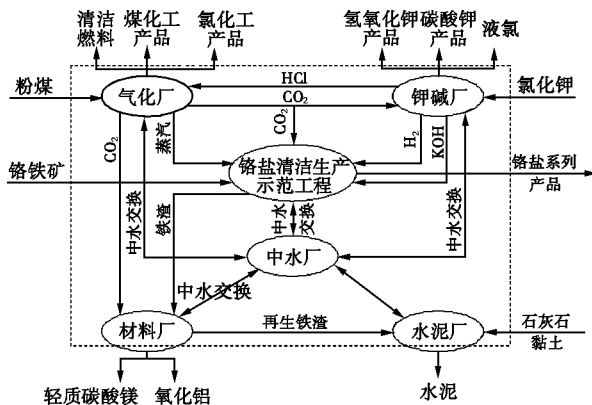


图3 铬盐清洁生产生态工业系统物质流共生网络示意图

该系统形成了物质流共生网络,其中主要的物质流交换包括:

(1)钾碱厂的30%氢氧化钾中间产品提供给铬盐厂作为液相氧化反应原料,H<sub>2</sub>作为铬酸盐中间体制Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的清洁还原剂,氯化氢输送到气化厂生产氯化化工产品。

(2)气化厂的85%CO<sub>2</sub>废气分别提供到钾碱厂、铬盐厂与材料厂作为产品转化介质。

(3)铬盐厂的铁渣经材料厂提取镁、铝基材料后作为水泥厂的添加剂。

(4)气化厂还向其他企业提供煤气、蒸汽清洁能

源,并通过中水厂实现水回用。

## 2.3 能量与水集成方案

煤气化厂的公用工程系统为生态工业园区的中心供热系统,通过整体系统的能量集成,使热量以不同品位在企业群落之间降阶使用。低品位热量以温水作为载体,中水处理厂为节点回收利用,实现了能量集成与用水集成的双重优化。

以铬盐清洁生产示范工程为核心的工业生态系统建立了铬化工清洁生产新模式,实现资源深度多级利用目标,初步形成了循环型工业系统。

## 3 结论

循环经济将资源-环境-经济问题的解决提高到了一个更高层次,能从根本上解决社会可持续发展问题,做到人类的生产活动与自然协调发展。对于重污染的过程工业来说,发展源头减污的清洁生产工艺是建设循环型过程工业系统的本质与核心;绿色化学、绿色过程工程与生态工业是实现这一目标的技术支撑。笔者就此初步提出了一个统一的设计框架,并应用于以铬化工清洁生产示范工程为核心的生态工业系统发展,希望能够有效地指导从绿色化学新工艺构建环境友好的工业生态系统,实现过程工业的循环经济。

## 参考文献

- [1] 中国科学院可持续发展战略研究小组. 2004 中国可持续发展战略报告[M]. 北京: 科学出版社, 2004. 261.
- [2] Anastas P T, Warner J C. Green Chemistry: Theory and Practice[M]. New York: Oxford University Press, 1998.
- [3] 张懿. [J]. 过程工程学报, 2001, 1(1): 10 - 15.
- [4] Marteel A E, Davies J A, Olson W W, et al. [J]. Annu Rev Environ Resour, 2003, 28: 401 - 428.
- [5] 李有润, 沈静珠, 胡山鹰, 等. [J]. 化工学报, 2003, 52(3): 189 - 192.
- [6] 杨友麒, 石磊. [J]. 化工进展, 2004, 23(1): 17 - 23.
- [7] Zhang Y, Li Z H, Qi T, et al. Green manufacturing process of chromium compounds[A]. In: AIChE Spring National Meeting[C]. New Orleans, LA, USA, 2003. ■

你想知道粉体加工技术及相关行业信息吗?

请浏览 中国粉体工业信息网 [www.chinapowder.cn](http://www.chinapowder.cn)

粉碎 分级 纳米颗粒制备 混合 分散 改性 造粒 干燥 烧结 散料输送 贮存 粉体检测 粉尘爆炸控制等

010-62772725 62772135(Fax)

清华大学材料系逸夫技术科学楼 2713 室