

流程制造业本质性分析

樊炯明¹, 胡山鹰¹, 陈定江¹, 张群¹, 李瑾¹, 李光耀¹,
宋晓旭¹, 金涌¹, 陈丙珍¹, 殷瑞钰²

(1. 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 北京 100084; 2. 钢铁研究总院, 北京 100081)

摘要: 为了能对流程制造业未来的发展方向有更加深刻的认识, 本文从流程制造业中各行业的共性特点出发, 将分析的视角从单一行业拓展到整个流程制造业, 立足于热力学和熵等概念, 对流程的本质及本质性特征进行了清晰深入的分析研究, 构建了以“流”-“程”、“物质”-“能量”-“信息”、“规模”-“效率”三组重要因素为主的本质性分析框架, 并对化工流程和磷化工流程案例进行了本质性分析。结果表明流程制造业发展的根本方向是要追求整体系统的熵增量趋向最小, 而不是仅追求流程系统的熵减而忽视了外部环境系统中产生的熵增。要使整体系统的熵增趋向最小, 不仅要关注流程系统的经济效益, 同时也要提高资源和能源、环境效率。效率的提升本质上需要技术的改进、升级、创新来提供支撑, 在流程系统中技术的改进升级可以小幅度提升流程系统的效率, 而将颠覆性创新技术引入流程系统则可能使效率大幅度提升。

关键词: 流程制造业; 熵; 流程系统; 本质; 本质性特征

中图分类号: TB1 **文献标识码:** A

A Study on the Essence of Process Manufacturing

Fan Jiongming¹, Hu Shanying¹, Chen Dingjiang¹, Zhang Qun¹, Li Jin¹, Li Guangyao¹,
Song Xiaoxu¹, Jin Yong¹, Chen Bingzhen¹, Yin Ruiyu²

(1. Center for Industrial Ecology, Department of Chemical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;
2. Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081, China)

Abstract: Process manufacturing is an important pillar of China's economic development, and its orderly and healthy development is of great significance to China's economic and social development. However, the development of process manufacturing is constrained by its enormous consumption of resources and energy and its serious environmental impact. To reach a deeper understanding of the future development of process manufacturing, this study extends an analytical perspective from a single industry to all forms of process manufacturing. Based on the concepts of thermodynamics and entropy, this study analyzes the essence of process manufacturing. Three groups of key factors are used to build the analysis framework: *flow and process*; *material, energy, and information*; and *scale and efficiency*. A chemical engineering process and a phosphorus chemical process are then analyzed using this framework. The results show that the fundamental direction of the development of process manufacturing is to minimize the entropy increments of the whole system, rather than only those of the process system, while ignoring the entropy increments of the system of the external environment. In order to minimize the entropy increments of the whole system, it is necessary not only to pay attention to the economic benefits of the process system, but also to improve resource, energy, and environmental efficiency. To improve efficiency, the technology involved requires improvement, upgrading, and innovation. Improving and upgrading the technology can slightly improve the efficiency of a process system, while revolutionary innovation in the technology may greatly improve the efficiency.

Keywords: process manufacturing; entropy; process system; essence; essential characteristic

收稿日期: 2017-04-25; 修回日期: 2017-05-13

通讯作者: 胡山鹰, 清华大学化学工程系生态工业研究中心, 教授, 主要研究领域方向为生态工业系统设计、分析、集成方法, 循环经济理论与实践; E-mail: hxr-dce@tsinghua.edu.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“制造强国战略研究(二期)”(2015-ZD-15); 中国工程院咨询项目“流程制造业本质性研究及创新发展战略”(2015-ZCQ-009); 国家自然科学基金项目(L1522024)

本刊网址: www.enginsci.cn

一、前言

流程制造业（又称为流程工业或过程工业）是指原料经过混合、分离、成型或化学反应等一系列改变其物理、化学性质的过程，使原料增值，获得具有特定物理、化学性质及特定用途的产品的工业。

典型的流程制造业（比如化学工业）的生产流程，在时间上和空间上是处于连续运行的状态，原材料连续投入、产品连续产出，中间无中断，除定期的设备检修及意外事故外，生产流程不停工。连续运行的生产流程一般只生产某一种或几种固定的产品，只有在技术工艺革新或升级换代后，才有可能改变产品的类型、工艺参数及生产所需的原材料类型。

流程制造业主要包括钢铁、有色金属、化工、建材、造纸、食品、制药等行业，是我国经济发展的重要支柱。我国流程制造业相关产品的产量和产值都很大，在全世界范围占有很大的比重。例如，2015年，我国的粗钢产量为 8.04×10^8 t，占全世界粗钢产量的49.5%；电解铝产量为 3.111×10^7 t，占全世界电解铝产量的54.6%；水泥产量达到 2.348×10^9 t，占全世界水泥产量的57.3%。流程制造业的有序健康发展对我国经济与社会的稳定发展有着重要的意义。

二、流程制造业的共性特点

流程制造业包括了钢铁、有色金属、化工、建材等多个行业，大多数是针对流程制造业如何有序健康发展的研究，内容专注于一个特定行业的发展，包括其发展方向及发展策略。例如，钢铁工业、有色金属行业、建材行业等典型流程制造业的发展方向及发展策略已经被深入透彻地分析和研究。我国钢铁工业规模大、净出口量大，面临着资源、能源消耗高，环境负荷重等多方面问题[1]，钢铁工业未来需要实现绿色发展，发挥钢铁工业的三大功能，与其他行业及社会构建生态链接[2~4]。同样作为典型流程制造业，有色金属行业也面临着相似的问题。有色金属行业未来的发展需要以技术创新为核心[5]，用技术进步推动有色金属行业的污染防治、废物综合利用、清

洁生产等[6]，实现有色金属行业的绿色发展、循环发展与低碳发展[7]。技术发展推动行业绿色发展、可持续发展的策略思路同样适用于典型流程制造业——建材行业[8,9]，尤其是绿色建材相关技术的发展，以及相关标准、制度的完善对于建材行业的发展具有重要意义[10]。

对于单一行业如何发展的研究已经较成熟，但很少有研究跳出单一行业，从流程制造业整体的角度去研究。本文通过分析流程制造业各个行业的共性特点，来探究流程制造业的本质，认识其本质性特征，进一步对流程制造业进行本质性分析，根据本质性分析提出流程制造业的发展战略。

流程制造业中各行业的共性特点可以总结如下。

(1) 在生产流程中，流程制造业主要使用大宗自然资源（如矿产资源、水资源等）作为生产原材料；

(2) 在生产流程中，大量的物质流和能量流通过物理或化学变化，转化成人们所需要的目标产品；

(3) 流程制造业的生产流程主要是通过功能不同的单元操作（或称工序）串联或并联作业，协同运行，实现连续或准连续生产；

(4) 大量的物质和能量被输入到生产流程，同时，物质和能量又通过各种形式的排放过程和废弃过程从生产流程输出；

(5) 人们通过从生产流程中获取信息（如设备运行参数等）和向生产流程注入信息（如市场需求、工艺技术参数、政策要求等）来调控生产流程，保证其按照人们的目标有序运行；

(6) 对于流程制造业，规模效应能够提高生产效率，降低生产成本。因此，现阶段流程制造业的规模很大，并且人们还在不断扩大规模。

根据上述的共性特点，可以将各个行业中的生产流程进行概念层面的归纳总结，如图1所示。

流程制造业的共性特点使得各行业在现阶段都面临着相似的问题和挑战，例如，资源、能源和环境等方面的制约，而要解决这些问题和挑战，行业的发展方向和发展战略必然有共通之处。因此，将分析视角从单一的行业拓展到整个流程制造业，探究流程制造业的本质及本质性特征，目的是可以让我们更好地把握流程制造业的发展方向 and 制定未来流程制造业的发展战略。

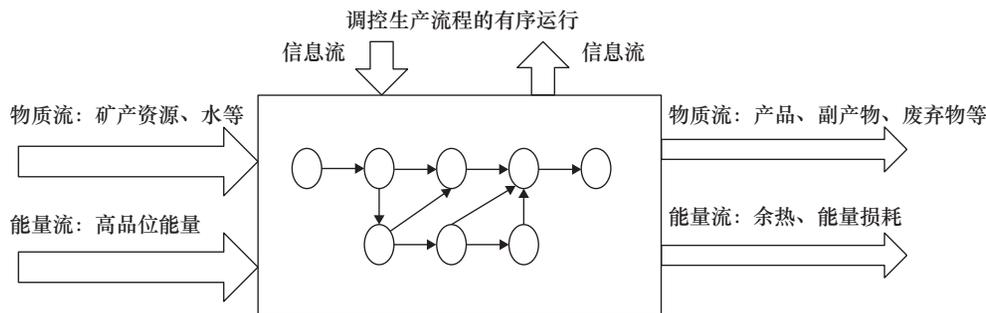


图1 流程制造业生产流程概念示意图

三、流程的本质及本质性特征

流程制造业的核心在于生产流程，要从本质上对流程制造业进行清晰深入的认识，需要对生产流程的本质和本质性特征进行分析研究。

可以用热力学来从宏观角度研究物质的性质和规律，而流程制造业所包含各行业的生产流程都可以看作是热力学系统，因此，从热力学的角度，可以最为清晰全面地描述流程的本质，即：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操作通过非线性耦合构成的复杂系统。在这个系统中，物质流在能量流的驱动作用下，在信息流的指导作用下，按照预先设定的程序，沿着流程网络系统动态有序地运行，运行的过程包含着一系列的化学反应和物理变化。

熵是热力学中描述系统状态的重要参数，要清晰描述流程的本质性特征，可以从熵的角度入手。从流程的本质可以知道，流程是一个开放的、非平衡的、不可逆的系统，那么实际上，流程系统就可以看作一个典型的耗散系统，通过不断地与外界交换物质、能量和信息，物质流、能量流和信息流在流程系统中发生转化，然后又作用于外部环境，在外部环境变化达到一定阈值后，从无序状态转变为规范有序的状态。因为流程系统是一个耗散系统，在不断地向规范有序的方向发展，所以，流程系统是一个熵减的系统。

之前人们所关注的焦点主要是如何让流程系统更加有序，即流程系统的熵减更多，正因为人们的视野局限于流程系统本身，而忽略了同样重要的外部环境系统，导致了流程制造业面临着环境污染、资源能源制约等问题。研究流程制造业未来如何发展，应当将流程系统和外部环境系统

看作一个整体系统，从整体的角度来更全面透彻地分析流程的本质性特征，制定流程制造业的发展战略。

流程系统的运行和发展离不开外部环境系统。外部环境系统为流程系统提供物质流、能量流和信息流，并且流程系统运动的驱动力主要来自外部环境系统提供的能量流。为了能让流程系统更加有序，达到熵减的目标，外部环境系统为流程系统提供了能量，或者可以理解为外部环境系统对流程系统通过注入能量流做功，从而，外部环境系统产生熵增，由于热不可能全部转化为功，外部环境系统熵增的绝对值大于流程系统熵减的绝对值。对于整体系统，其熵变等于流程系统与外部环境系统熵变之和，因此整体系统处于熵增的状态。这就是流程的本质性特征。如果整体系统在很长时间内都处于大幅度熵增的状态，虽然流程系统向着稳定有序的方向在发展，但整体系统将逐渐进入混沌无序的状态。

为了使流程制造业能够持续稳定地发展下去，流程制造业发展的根本方向是在流程系统和外部环境系统所构成的整体系统中，单位熵增所创造的价值越来越大；或是在满足人们物质需求的前提下，整体系统的熵增量越来越小。这样，整体系统的熵增才能维持在一定范围内，不会达到熵增过大进入混沌无序的状态。

在流程不断发展的过程中，工艺的改进，技术的升级，信息流的注入，都可以提高外部环境系统向流程系统提供驱动力时热转化为功的效率，从而使达到流程系统所需熵减付出的代价（即外部环境系统的熵增）不断减少，整体系统的熵增也会随之不断减少。因此，流程制造业的演化发展离不开工艺技术的创新，离不开对信息流更高效的利用。

四、流程制造业的本质性分析

(一) 本质性分析框架

对流程制造业进行更深入的本质性分析，分析其演化历程，提出流程制造业未来的发展战略，需要从更具体更易理解的角度入手，因此，“流”-“程”、“物质”-“能量”-“信息”、“规模”-“效率”这三组流程中的关键因素被选取作为本质性分析框架（见图2）。

“流”是流程系统运行的主体，其中，物质流是流程系统运行的核心，将原料制成产品是流程系统最重要的功能；能量流是流程系统运行的驱动力，推动物质流的流动以及流程系统中的物理变化和化学反应；信息流是流程系统有序运行的保障，确保物质流和能量流在系统中沿着既定路线流动以及“三传一反”过程的高效。

“程”则可以理解为流程系统的“硬件”。“程”是由单元操作非线性耦合形成的一个集合，单独的单元操作又可以看作多个技术的集合，所以“程”在更深层次上，可以看作是一个将物理、化学、生物现象进行人为地控制、集成和应用，将技术非线性耦合集成来生产满足人类需求的产品形成的一个技术的集合（见图3）。

在流程系统中，“流”和“程”互相带动着另一方进行变化革新。在“流”的层面，物质流、能量流都遵循着“三传一反”的基本原理，“流”的

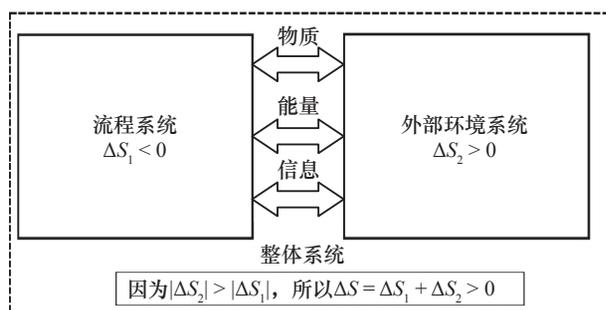


图2 流程的本质性特征

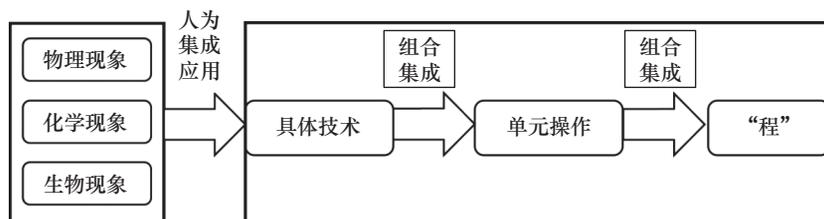


图3 “程”的概念示意图

发展主要体现在不断地提高物质流和能量流“三传一反”的效率，而提高“三传一反”效率，依靠的是对原有技术的改进、升级、更替和新技术的引进，这些都是技术的集合——“程”所包含的元素发生了变化。因此，“程”的演变进化为“流”的演变进化提供支持，而“流”的演变进化又产生了新的“程”的演变进化的需求方向，在这两者不断相互作用的过程中，流程系统不断地向更高效、更有序的方向进化。

随着流程制造业的发展，当人们的焦点不仅局限于流程系统本身，外部环境系统也进入到人们所关注的范畴时，就需要梳理外部环境系统与流程系统的相互关系与作用。

“物质”-“能量”-“信息”这三者将外部环境系统和流程系统紧密地联系起来，外部环境系统与流程系统时刻都在进行着“三传三反”过程，即“物质”、“能量”和“信息”在流程系统与外部环境系统之间不断进行着传递，并且同时伴随着反应（转化）过程。“物质”和“能量”大多以实体的形式（如原料输入、燃料输入等）从外部环境系统输入到流程系统，在流程系统中经过反应（或转化），又以实体的形式（如产品输出、余热余压等）从流程系统中输出到外部环境中。“信息”则主要以非实体的形式作用于流程系统，管控“程”这个集合所包含的单元操作或技术的范畴，以及技术或单元操作耦合连接的方式（见图4）。

随着人们逐渐开始从整体系统熵变的角度来衡量发展的优劣，为了使整体系统的熵增量减小，需要使外部环境系统与流程系统间的物质流、能量流和信息流的传递与转化效率更高，这使得流程制造业要向绿色化和智能化的方向发展。

在流程制造业发展的过程中，有两个衡量流程制造业发展状态的重要因素，即“规模”和“效率”。

“规模”是指流程系统的体量，例如，人们熟悉的总产值、资源消耗总量、污染物排放总量、污

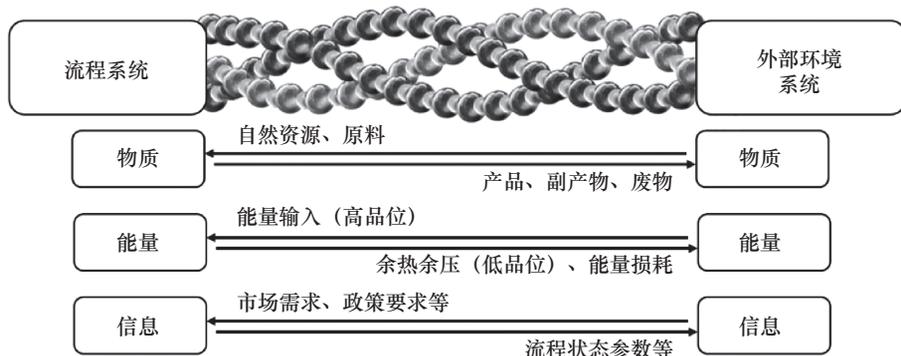


图4 流程系统与外部环境系统的相互作用

染物堆存总量等总量指标，都可以用来表征规模。流程系统规模的扩大会带来规模效应，一定程度上能够提高效率，增加收益，但当规模扩大到一定体量后，继续扩大规模可能导致资源供给达到上限从而出现资源供给紧缺，或是环境影响大于流程系统外部环境系统的承载能力。

“效率”包括资源效率、能源效率、环境效率等，例如，人们熟悉的各种强度指标资源产出率、万元GDP能耗等。流程总是会向着不断提高效率的方向发展，但是在不同的发展阶段中，发展的重点是不同类型的效率。在初始阶段，人们较为重视流程系统的经济效益（如总产值、总利润等），随着资源、环境压力的增大，人们逐渐开始在保证经济效益的情况下，追求更高的资源效率和环境效率。

这三组关键因素可以与时间轴相结合构建本质性分析框架，来清晰地梳理流程制造业的演化发展历程，为流程制造业的发展提供参考。

（二）化学工业的历史发展分析

化学工业属于典型的流程制造业。流程制造业的共性特点在化学工业都有明显的体现，本文对化学工业的历史发展进行分析，在大时间跨度历程考查流程本质性特征。

化学工业的发展可分为三个时期：种子期、萌芽期和大发展时期。

在化学工业发展的种子期（18世纪以前），典型的化工流程包括晒盐、酿酒、冶炼等。在种子期，化工流程系统的“程”较简单，工序数量少且流程结构简单呈一条链状，同时，人们对于技术的认识不深刻，主要靠经验来支撑流程系统的运行。在“流”的层面，进出流程系统的物质流种类较少，所得产品较单一；能量流以生物质能源和太阳能为主；

信息流主要是人们从流程系统获取的实践经验，人们将实践经验总结分析后又应用于流程系统。由于当时技术条件、经济发展水平等外界因素限制，流程系统的规模难以达到一定规模，因而种子期的流程系统大多都处于较小规模，或可称为“家庭作坊式”规模。同样由于技术条件的限制，资源效率和能源效率都处于低水平。由于规模小，造成的环境影响很小（即外部环境系统熵增量小），环境效率处于中等水平。

在化学工业发展的萌芽期（18—19世纪末），典型的化学工业流程包括制硫酸、制盐酸、制有机染料、合成高分子材料等。在萌芽期，“程”的复杂度逐渐提升，流程结构不再是一条简单的直链，单元操作的概念已经确立，人们开始认识到技术的革新对于提升流程效率、推动流程制造业发展的重要性。在“流”的层面，进出流程系统的物质流种类增加，制取主产品同时还会获得副产品；能量流以化石能源为主；在信息流中，人们将新工艺、新技术与市场需求输入流程系统，推动流程的演变和进化。随着社会经济发展水平的提升，技术的不断进步，萌芽期的流程系统规模有所扩大，出现了大量的化工厂。规模的扩大带来了经济效益的提升，技术的革新提高了资源、能源效率，但由于人们还没有意识到资源、能源、环境方面的问题，资源效率和能源效率仍处于中等水平，环境影响大幅度提升，环境效率处于低水平。

20世纪初，化学工业进入了大发展时期。“程”的层面上发展迅速，技术的快速发展推动了流程的演变和进化，产业链不断延伸并通过耦合联产等方式向网状发展；在“流”的层面，进出系统的物质流流体量大，种类繁多，产品多元化；能量流以化石能源为主，近年来为了应对化石能源供给问题，

太阳能、生物质能等新能源也成为了流程系统新的能量流输入；信息流的体量随着自动化、信息化的发展呈指数上升，人们通过高效地获取利用信息流，推动了流程系统向更稳定、更有序的方向发展。流程系统的规模在大发展时期随着技术的进步和经济水平的提升带来的资金支持有了飞跃式的扩增，出现许多大型甚至世界级的企业，如超大型炼化基地。规模的飞跃推动了经济效益的大幅上升，资源效率和能源效率随着相关技术的发展进一步提高，但更大的规模也意味着更大的环境影响，环境效率并没有很大改善，技术仍有待提高。

在对化学工业的历史发展过程进行了清晰地定性梳理之后，可以利用本质性分析框架的三组关键因素对化学工业的演化发展进行本质性分析，结果如表 1 所示。

从表 1 中各组关键因素所发生的变化可以看出：在“程”的层面，技术不断地在发展，现有的技术不断优化升级，同时也有新的技术加入到流程系统中，另外，流程系统在结构上也越来越复杂，产业链逐渐延长，并且多条产业链发生耦合形成产业链网。

在“流”的层面，技术的变化使得物质流和能量流在流程系统中进行“三传一反”过程的效率不断提升，而信息流则是借助相关技术在化学工业中的应用从种子期的基本未被利用，逐渐发展到在流程系统中发挥管控调节的重要作用，信息流从利用的体量和利用的效率上都有了跨越式的变化。

在“规模”层面，得益于技术的演变以及整体

社会经济水平的不断发展，流程系统的规模在不断的扩增，其创造的经济效益也不断提升，伴随着规模的扩大，流程系统所造成的环境影响也不断增加。

在“效率”层面，技术的优化升级使得资源效率和能源效率不断提高，而在从种子期到萌芽期的过程中，由于对环境影响的忽视以及流程系统规模的大幅扩增使得环境效率在萌芽期下降到极低的水平，在大发展时期，随着人们逐渐重视环境影响，以及工艺技术不断向更清洁、更绿色、更环保的方向发展，流程系统的环境效率得以大幅提升，但仍有很大的提升空间。

从化学工业演化发展的历程可以看出，流程演化发展的根本驱动力是技术的演变创新，创新推动着流程不断进化，规模逐步扩大，效率不断提升，流程系统在向着稳定有序（熵减）的方向发展。在现阶段，人们开始追求整体系统的熵增量更小，从而追求更高的资源效率和环境效率，以及对于信息流更合理高效的运用，这些重要需求是流程制造业未来发展需要满足的。

五、磷化工产业演化分析

化工行业包含众多子行业，本研究选取特定磷化工产业进行本质性分析。磷化工属于典型的化学工业，是我国工农业发展的支柱产业。随着我国经济的发展以及工农业对于磷化工产品需求的高速增长，磷资源紧缺这一尖锐而突出的问题成为了我国磷化工发展的瓶颈之一。随着我国人口的增长、城镇化加快以及磷矿石贫化，我国磷矿石的储量也只能维持几十年。磷化工作为典型的资源型化学工业，研究其如何充分利用资源、提高资源效率，以及与外部环境系统形成良好的相互作用关系，对于国民经济的发展有着深远的战略意义。

磷元素在自然界中主要以磷酸盐矿的形式存在，同时也是生命体中重要的组成元素之一。人们目前大量开采磷酸盐矿，以一种粗放低效率的形式使自然界中的磷元素进入到动植物等生命体中，同时有大量的磷元素流失到土壤和水中，并没有再被利用，导致磷化工面临资源紧缺的问题。

磷化工在面临着资源紧缺的同时，还承受着产能过剩带来的巨大压力。由于我国低水平磷肥产品重复建设，产能集中释放造成了严重的产能过剩。

表 1 化工流程演化的本质性分析

关键因素	种子期	萌芽期	大发展时期	
“程”	技术先进程度	*	***	****
	流程结构复杂度	*	**	****
“流”	“三传一反”效率	*	***	****
	信息流利用	*	**	***
规模	流程规模	*	**	****
	总经济效益	*	**	****
	环境影响	*	***	****
效率	资源效率	*	**	***
	能源效率	*	**	***
	环境效率	**	*	**

注：* 从少到多代表水平由低到高。

在磷肥的施用环节，过度施肥带来的土壤板结、土壤酸化直接威胁着土壤环境安全；不合理的施用导致肥料利用率较低，土壤中过剩的营养成分经过雨水冲刷，汇聚到自然水体中，造成水体富营养化；磷化工生产过程中产生大量的磷石膏，其大量堆存的对环境形成了严重威胁。

湿法磷酸和热法磷酸是我国磷化工的两种主要技术工艺路线，为了更清晰地描述流程系统的状态，将流程系统分为湿法磷酸子系统和热法磷酸子系统。在时间维度上，将磷化工流程系统的演化发展历程分为初级资源加工、规模化全流程生产、跨行业循环链接三个阶段，对不同阶段磷化工流程系统资源效率、能源效率和环境效率进行了计算分析。

首先从磷化工中“流”和“程”的层面进行分析。在初级资源加工阶段，磷化工的发展处于起步阶段，在“程”层面，流程结构较简单，主要的生产环节包括硫酸浸取磷矿制磷酸、磷酸与合成氨制取磷铵和电炉分解磷矿石制黄磷。在“流”层面，输入流程系统的物质流主要是磷矿、硫酸、合成氨、水、煤和硅石，从流程系统输出的物质流包括年产60 000 t 磷铵、2 000 t 黄磷和磷石膏、磷渣、磷铁、磷泥等固体废物，以及电炉尾气与粉尘（见图5）。输入流程系统的能量共4 097 tce/a。

到了规模化全流程生产阶段，在“程”层面，流程结构未发生明显的变化，工艺技术发生了升级革新，人们开始意识到热法磷酸技术高能耗的劣势，磷化工行业逐渐从热法磷酸主导发展为热法与湿法共存。在“流”的层面上，由于流程系统的规模扩大，输入与输出的物质流和能量流体量相比第一阶段大幅度提升，磷铵的产量达到150 000 t/a，黄磷的产量达到5 000 t/a，但同时产生了大量的磷石膏、磷渣等固废，并且固废的产生量远远大于产品产量，大量固废的堆存带来了一系列环境问题，对磷化工的发展形成制约。

在跨行业循环链接阶段，在“程”的层面，相比前两个阶段，流程结构发生了较大变化，为了消纳废弃物，减少环境的制约，磷化工流程系统与盐化工、建材行业构建产业循环链接，实现磷石膏、磷渣的资源化利用。在湿法子系统中将磷石膏与盐化工行业的废弃物盐石膏作为原料，添加辅料（如焦炭、铝矾土等）生产水泥与硫酸；在热法子系统中将磷渣作为建材行业的原料，添加辅料（如石

英石、白云石等）生产微晶玻璃和人造硅灰石。在“流”的层面，随着“程”的变化，输入和输出的物质流也发生了变化，并且由于固废带来的制约作用被削弱，流程系统的规模进一步扩大，主要产品磷铵的产量达到了300 000 t/a，黄磷的产量达到了7 000 t/a（见图6），输入流程系统的能量也高达15 780 tce/a。对磷化工流程“规模”层面的定量比较结果如表2所示。

流程系统的规模在这三个阶段呈逐渐扩大的趋势，从产品产量变化、资源消耗量变化、能源消耗量变化以及产值变化都可以反映出这一趋势。而在第二阶段到第三阶段，产品产量大幅度上升，废物产生量大幅度减少，是因为第三阶段实现了磷化工

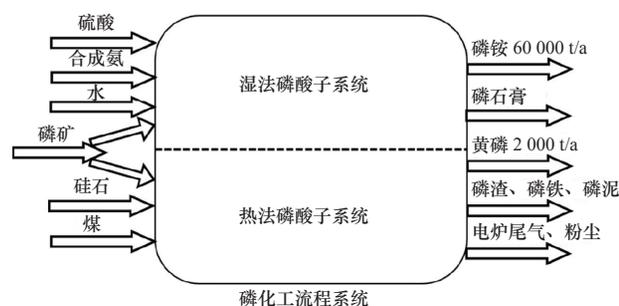


图5 磷化工流程系统——初级资源加工阶段

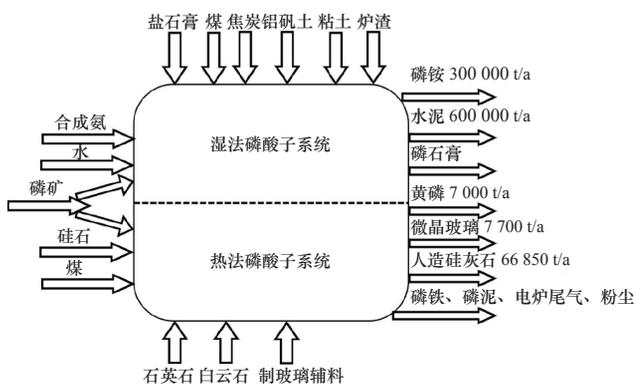


图6 磷化工流程系统——跨行业循环链接阶段

表2 三个阶段规模层面比较

规模	第一阶段	第二阶段	第三阶段
产品 /t	62 000	155 000	981 550
废物 /t	190 998	443 955	375 230
资源消耗 /t	369 349	705 660	1 482 270
水耗 /t	184 445	372 400	649 850
能耗 /tce	4 097	9 618	15 780
产值 /万元	14 900	37 250	95 161

与盐化工、建材行业的产业循环链接,将磷化工中的大宗固废——磷石膏和磷渣进行资源化利用,用于生产水泥、微晶玻璃和人造硅灰石,从而产品种类增加,产品产量提升,废物产生量减少,同时也推进了产值的大幅度提升。

进行“效率”层面的分析,需要先对衡量资源效率、能源效率和环境效率的指标明确地定义,表3是对流程系统的效率进行衡量的指标。

对磷化工流程“效率”层面的定量比较结果如表4所示。可以看出,磷化工流程系统的资源效率、能源效率和环境效率从第一阶段到第二阶段小幅度提升,主要原因是规模扩大产生的规模效应与工艺技术的升级;从第二阶段到第三阶段,资源效率、能源效率和环境效率均有大幅度提升,因为在跨行业循环链接阶段,湿法磷酸子系统盐化工行业建立产业循环链接,利用磷石膏成为生产硫酸和水泥的原料,从而减少了废物产生量,同时,生产的硫酸全部用于湿法磷酸生产过程,减少了资源消耗量,生产的大量水泥增加了产品产量与湿法子系统的产值;热法磷酸子系统与建材行业建立产业循环链接,利用磷渣生产微晶玻璃和人造硅灰石,减少了废物产生量,生产的产品创造可观的产值。流程系统在这一阶段通过固废的资源化利用,大幅度减少了废物产生量,提升了产品产量和产值,从而使资源效率、能源效率和环境效率都能够大幅度提升。

效率的提升依靠产业循环链接的建立,而产业循环链接的建立需要相关工艺技术在流程系统中的成熟应用。流程系统中的“程”是一个技术的集合,这个集合所包含的元素发生的变化推动着流程的演化发展。集合中已有元素的变化(即技术改进、升级)使流程的效率能够小幅度提升,而向集合中添加新元素(即向流程系统引进新技术)则可能使流程的效率大幅度提升。

六、结语

流程可以看作是一个由不同单元操作非线性耦合构成的复杂系统,物质流、能量流和信息流从外部环境系统进入到流程系统,在流程系统中发生转化,然后又作用于外部环境系统。流程系统是一个耗散系统,通过能量流和信息流的注入,向着更稳定有序的方向发展,即发生熵减;但与此同时外部环境系统必须承受熵增的代价,并且熵增量大于熵减少量,整体系统是熵增的。流程制造业发展的根本方向是使整体系统的熵增逐渐减小,整体系统能够稳定地运行下去,而不应仅关注于流程系统本身的熵减,忽略了外部环境系统的熵增。

通过对化学行业的历史发展和对磷化工案例演化的本质性分析,可以看出流程制造业要向整体系统熵增更小的方向发展,不应仅关注于扩大规模提

表3 效率指标定义

效率类型	指标	计算方法
资源效率	资源利用率	产品产量 / 资源消耗量
	单位产值资源消耗量	资源消耗量 / 万元产值
	单位产值水耗	水消耗量 / 万元产值
能源效率	单位产值能耗	能源消耗量 / 万元产值
	吨产品能耗	能源消耗量 / 产品产量
环境效率	单位产值废物产生量	废物产生量 / 万元产值

表4 三个阶段效率层面比较

效率类型		第一阶段	第二阶段	第三阶段
资源效率	资源利用率 / %	17	22	66
	单位产值资源消耗量 / (t / 万元)	24.8	18.9	15.6
	单位产值水耗 / (t / 万元)	12.4	10.0	6.8
能源效率	单位产值能耗 / (tce / 万元)	0.27	0.26	0.17
	吨产品能耗 / (tce / t 产品)	0.066	0.062	0.016
环境效率	单位产值废物产生量 / (t / 万元)	12.82	11.92	3.94

高经济效益，还应该通过技术的改进升级与创新来提升系统的资源、能源和环境效率。技术的改进升级可以小幅度提升流程系统的效率，而颠覆性的创新技术则有可能大幅提升流程系统的效率，从而大幅减少整体系统的熵增，使整体系统稳定有序地运行下去。

参考文献

- [1] 张春霞, 王海风, 张寿荣, 等. 中国钢铁工业绿色发展工程科技战略及对策 [J]. 钢铁, 2015, 50(10): 1-7.
Zhang C X, Wang H F, Zhang S R, et al. Strategic study on green development of Chinese steel industry [J] Iron and Steel, 2015, 50(10): 1-7.
- [2] 殷瑞钰. 钢厂三大功能与行业转型升级 [J]. 科技创新与品牌, 2013 (11): 21.
Yin R Y. Three major functions of steel mills and industry transformation and upgrading [J] Sci-tech Innovations and Brands, 2013 (11): 21.
- [3] 徐乐江. 钢铁业的绿色发展内涵 [J]. 中国投资, 2008 (7): 70.
Xu L J. The green development of iron and steel industry [J] China Investment, 2008 (7): 70.
- [4] 程志民, 安霞. 钢铁企业资源综合利用与绿色发展 [J]. 环境工程, 2013, 31(4): 102-104.
Cheng Z M, An X. Green development and resource comprehensive utilization in iron and steel enterprises [J]. Environmental Engineering, 2013, 31(4): 102-104.
- [5] 胡长平. 技术进步打造有色发展利器 [J]. 有色金属工业, 2005 (12): 38-39.
Hu C P. Technology progress: A great tool in nonferrous metal industry development [J] China Nonferrous Metals Industry, 2005 (12): 38-39.
- [6] 邵朱强, 田丰. 中国有色金属行业绿色发展和技术转型 [J]. 环境保护科学, 2016, 42(2): 18-21.
Shao Z Q, Tian F. Green development and technology transformation of non-ferrous metal industry in China [J]. Environmental Protection Science, 2016, 42(2): 18-21.
- [7] 刘梦飞. 绿色发展规划有色绿色未来 [J]. 中国有色金属, 2016 (15): 40-41.
Liu M F. Green development for green future [J] China Nonferrous Metals, 2016 (15): 40-41.
- [8] 陈振广. 努力构建建材行业绿色发展新模式 [J]. 广东经济, 2010 (7): 26-28.
Chen Z D. Build a new pattern of building materials industry green development [J]. Guangdong Economy, 2010 (7): 26-28.
- [9] 李慧芳. “十三五”建材产业绿色发展思考 [J]. 中国建材, 2015 (11): 108-111.
Li H F. Thoughts on green development of building materials industry in the 13th Five-Year Plan period [J]. China Building Materials, 2015 (11): 108-111.
- [10] 姬亚芹. 中国绿色建材发展研究 [J]. 中国人口·资源与环境, 2001, 11(1): 115-118.
Ji Y Q. Study on development of green building material in China [J] China Population, Resources and Environment, 2001, 11(1): 115-118.