

化工动力多联产系统及其集成优化机理

林汝谋, 金红光, 高 林

(中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080)

摘 要:系统集成优化理论是发展多联产系统的最重要核心科学问题, 本集体依托国家重大科研项目开展相关研究, 得出部分阶段成果: 概述化工动力多联产系统的基本概念、本质特征与特点, 阐述研究提出的多联产系统集成原则思路与体现这些原则的优化整合手段, 以及从系统集成构成层面把多联产系统分为 5 类基本类型(简单并联型、综合并联型、简单串联型、综合串联型和串并联综合型等), 列举实例及分析其主要特征等。

关键词:多联产系统; 化工与动力; 集成优化; 基本类型

中图分类号: TQ013.2

文献标识码: A

1 前 言

历来, 能源动力与化工生产部门多相互独立发展。传统动力系统的核心为热力循环, 它关注的重点是燃料直接燃烧释放热能转换为有效机械功输出的能量转化利用问题, 旨在提高热功效率, 但至今措施多还局限于物理能范畴, 对常规系统存在的弊病(如燃烧过程燃料品位损失大等)没有质的改进。而传统化工生产过程关心的则是原料的组分与比例, 其关键是通过组分调整, 将原料中有效成份最大程度地转化为化工产品, 来提高产品产率, 但相应的未反应气不断再循环等措施却伴随着相对能

耗率的不断升高。总之, 分产系统往往片面地追求某个目标的思路, 使得它无法克服由此带来的能耗高、化学能损失大以及环境污染严重等问题。

因此, 系统整合思想受到重视, 许多多联产科研计划与示范工程项目正在实施, 许多学者进行相关研究^[1~12]。一些国际组织和国家将联产系统作为洁净煤技术的战略选择, 并拟依靠它来实现能源系统近零排放。如美国 Vision 21 计划和 Future Gen 项目等提出的虚拟能源工厂系统, 就是各种多能源综合、CO₂ 零排放的联产系统。日本 NEDO 在新阳光计划下提出 EAGLE 多联产项目, 研发重点是各种合成气转化利用的煤—基化工产品—电联产系统, 它们把多联产作为实现近零排放和循环经济与氢经济的洁净煤战略技术。欧盟在其 FP6 计划中开发以气化为核心、CO₂ 减排的电热氢联产系统。澳大利亚在 IGCC 基础上将煤发电、合成气产氢以及 CO₂ 控制联合起来, 作为今后发展方向。另外, 国外许多石化企业还积极发展发电供热和化工过程有机结合的 IGCC 多联产系统, 如意大利 ISAB 公司的 522 MW IGCC 联产系统等。我国从 20 世纪 80 年代开始研发

多联产系统, 如北京燕山石化公司的“煤代油”的联产系统、上海焦化厂的“三联供”系统以及兖矿集团简单叠加的多联产系统等。总之, 多联产已成为世界能源系统可持续发展的重要方向。但是, 多联产系统集成理论尚未引起足够重视, 缺乏全面和深层次研究, 还没有形成完整的理论体系, 相关理论研究滞后于工程应用发展。

本集体依托国家重要科研项目, 开展多联产系统研究^[1, 3~5, 13~18], 本文介绍有关系统集成理论部分的阶段成果: 概述化工动力多联产系统基本概念与特点, 阐述其集成原则思路与优化整合手段, 还从系统集成构成角度把多联产系统分为 5 类, 列举实例及分析其主要特征等。

2 多联产系统概念与特点

化工动力多联产系统是指通过系统集成把化工生产过程和动力系统中热力过程有机地整合在一起, 在完成发电供热等热工功能的同时, 还利用各种能源资源生产出清洁燃料(氢气、合成气与液体燃料等)和化工产品(甲醇、二甲醚等), 使能源动力系统既达到合理利用能源和低污染排放,

收稿日期: 2005-12-26

基金项目: 国家 973 计划多联产基金资助项目(2005CB221207); 国家自然科学基金重大研究计划重点基金资助项目(90210032)

作者简介: 林汝谋(1938-)男, 福建古田人, 中国科学院研究员, 博士生导师。

又使化工产品或清洁燃料的生产过程变得低能耗与低成本,从而协调兼顾了动力与化工两领域问题,为一个实现多领域功能需求和能源资源高增值目标的可持续发展能源利用系统。典型的多联产系统集成的单元技术,一般包括(如图1所示):合成气制备过程(气化、净化与显热回收单元),

制备技术、化工产品合成技术以及热功转换过程技术)以及不同的二次能源(电力、氢能)和化工产品与清洁燃料等联产输出,来实现不同用能系统整合与联产目标。化工动力多联产系统是多功能能源系统的一种重要形式,但它不等同于后者,更不是两种用能系统的简单叠加,而应该是基

或传统的热电联产认为是化工动力多联产。(3)把多联产系统与多功能系统等同起来。事实上,两者相对而言,后者在能源输入和系统功能等各个方面都覆盖更多涵义,而多联产系统主要特征则为“联产”。许多类型系统(如零排放的无公害能源系统、多能源互补的多重联合循环发电系统等)的主要功能不是“联产”,因而不是多联产系统,却常常是多功能系统。(4)多联产系统集成理论(包括基本概念、集成原则与优化整合等)尚未引起足够重视。多联产系统研究始终没有完全摆脱分产系统研究的思路,多从各自的层面出发提出的问题,而对多联产系统领域交叉的科学问题凝练与研究不够重视,没有实现真正的领域交叉与融合。

研究表明,化工动力多联产系统的本质特征是在多联产新概念基础上的系统集成。即通过对热工过程和化工过程集成优化整合,达到更合理的物质与能量综合梯级转换利用,从而形成一体化的能源资源利用系统,以实现领域交叉的多种目标。因此,它常常具有下列特点:(1)最有效地进行能源资源综合梯级与循环利用,以实现从能源资源到各种二次能源和化工产品转化过程的利用率最大化,具有相应单一转化过程(分产系统)难以达到的低能耗与高效率等性能指标。(2)最合理地进行多领域交叉,为统筹解决单个领域发展长期不能解决问题提供最有效途径和手段,具有协调兼顾了动力、化工、环境等多领域问题特点。(3)最大限度地包容多产品联产(电、热、清洁燃料、化工产品等),具有能源资源综合互补、产品灵活化、高增值化以及高市场需求变动适应性等

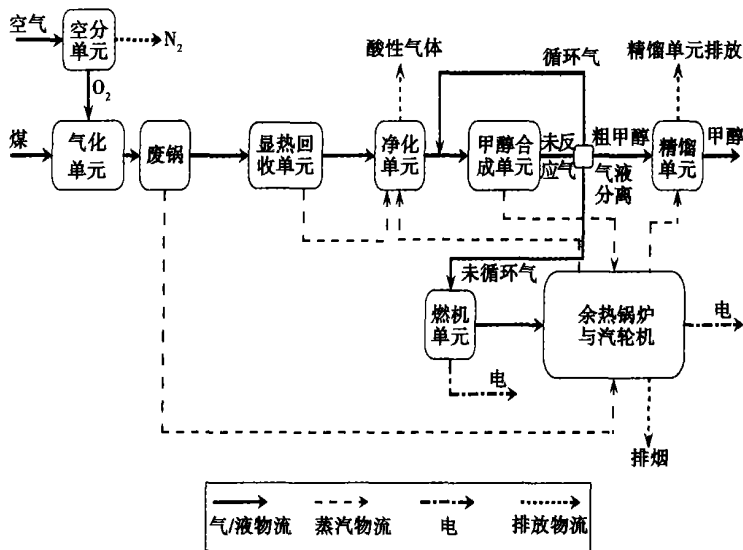


图1 综合串联型多联产系统流程示意图

混合气分离过程(如空分单元等), 甲醇、二甲醚(DME)等化工产品合成与精馏等过程, 以及由燃气轮机、余热锅炉与汽轮机等热功转换过程, 或和燃料电池等直接发电过程等组成。多联产已成为可持续发展的能源系统的重要形式与重点, 其远期目标是涵盖煤气化制氢、联合循环和燃料电池发电、清洁燃料生产、化工产品合成以及在联产基础上进一步考虑 CO₂ 减排功能等多联产综合优化。

通常, 多联产系统主要针对煤炭与天然气等单一化石能源资源输入, 包容不同的系统构成形式(串联型、并联型及混合型)、不同单元技术的集成(不同合成气

于一定原则思路有机整合的一体化联产系统。非常遗憾, 目前对多联产系统理解与研究存在许多问题, 如:(1)把多联产看成是不同用能系统的简单叠加。看作是相对独立的化工生产流程与动力系统的简单机械联合, 化工生产流程与动力系统基本保持与分产相同的结构, 仅通过回收部分弛放气等简单措施连接化工与动力两部分, 而对寻求更适合联产系统的化工或化学反应过程革新重要性认识不足。(2)把多联产系统简单理解为多产品系统。事实上, 化工过程系统历来就是多产品(或多联产)的, 热工领域也有热电联产或冷热电联产系统, 但不能把传统多产品的化工过程、

特点。(4)可最大限度地物质与能量转化过程和污染物控制过程一体化,具有低能耗、低成本的有害物质排放控制和污染极小化等的潜力。

3 多联产系统集成原则思路与优化整合

本研究尝试打破传统分产系统各自片面注重产品产率和循环效率的思路,探讨基于多联产系统的本质特征的系统集成理论。图 2 为研究提出的化工动力多联产系统集成原则思路示意图。该图以串联型多联产系统流程结构为例,诠释系统集成的核心科学问题,如物质与能量的综合梯级利用和能量转化过程与污染物控制过程一体化原理等。下面扼要概述多联产系统集成的 3 个原则思路及其相应的优化整合手段。

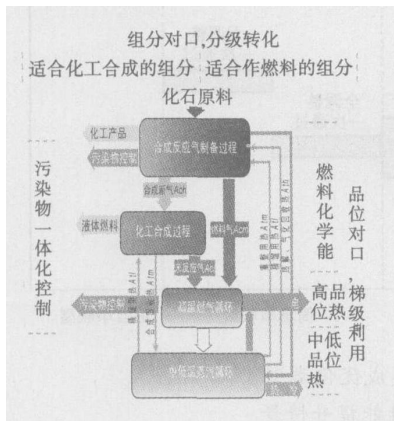


图 2 化工动力多联产系统集成原则思路示意图

3.1 组分对口、分级转化

该原则强调能源资源综合高效利用与组分对口的思路,首先要对进入系统的化石原料进行转化处理和组分调整的优化整合。如图 2 所示,进入系统的化石原料先经过合成气制备过程单元(包括热解、焦化、气化或重整等原料转化过程和水煤气变换、净

化等合成气组分调整过程),被转化为合成气,然后通过分段气化、部分调整或无调整等组分分级转化调控手段,将适合于化工合成的组分以合成反应新气的形式送往化工合成过程,而不适于化工合成的组分则可以作为燃料气直接送往动力系统。而且,进入化工合成过程的合成气不必全部转化为化工产品,不必片面追求转化率,可通过一次通过或适度循环等方式,将合成反应气中的有效成份尽量转化为产品,而未反应气则送往动力系统燃用,从而实现组分的第二次分级转化和原料转化与化工合成两个过程阶段的优化整合。

该原则对于多联产系统中化工过程和动力系统都是重要的,系统集成时应采取相应的优化整合手段,以最大程度地体现这个原则。对于化工生产过程,优化整合手段主要有:(1)使有效成份的组成符合合成反应化学计量比的需要;(2)使无效成份(即杂质)的含量达到合成反应限定的标准。如甲醇合成反应的理论最佳碳氢比为 1/2,碳氢比接近这一计量比和达到甲醇合成反应脱硫标准的合成气则更适用于用来合成化工产品。对于动力系统有:(1)使燃料组分与热力循环工质的对口匹配,以利于低能耗地分离燃烧产物中的 CO_2 等。如对于常规以空气为工质的热力循环,提高燃料中氢的浓度会减少燃烧产物中的 CO_2 含量,常常有利于降低污染物分离与处理的能耗;而 O_2/CO_2 循环系统则能适应任何碳和氢比例组分的燃料;(2)使燃料气的品位与燃料能量释放过程热能的品位尽量对口。即通过组分分级转化等措施,把更低品位的燃料送往动力系统,以减小燃

料化学能在燃烧释放热能过程中的品位损失。

3.2 品位对口、梯级利用

该原则强调从能的“质与量”相结合高度的思路进行系统集成。因为能量转换利用时不仅有数量的问题,还有能的品位的问题。能的品位是指单位能量所具有可用能的比例,是标识能的质量的重要指标。可以把能量大致划分为化学能与物理能两大类。物理能(热)品位 A_1 常常被认为释放或接受热量的热源温度所对应的卡诺循环效率,或直接用热源温度的高低来代表热的品位的高低。燃料的化学能同样也存在品位概念,但化学能品位 A_2 问题比较复杂,还没有明确的说法,从理论上它与燃料的组分有关,但在实际应用时更重视“组分对口”的应用价值的衡量杆杠。从图 2 中还可看到,多联产系统集成时不仅要重视原料资源化学能的综合梯级利用,而且要同样重视物理能的整合:将化工生产流程中副产的能量依据品位对口的原则送往动力系统转化为功,动力系统可以向化工流程提供最适合的热源或高效的动力,从而实现能的综合梯级利用。

多联产系统集成时,为了充分体现这个原则思路,可采用下列优化整合手段:(1)不同的用能系统及其构成过程的能量统一按“品位对口”原则,梯级优化利用。例如,燃料重整反应过程用热,不再沿用传统的燃料直接燃烧释放热能的方法,而从蒸汽系统中抽取温度对口的中低温热量等。(2)尽量缩小“燃料的化学能释放品位 A_2 与热力循环的物理能接收品位 A_1 ”品位差值。因为,在燃料燃烧过程中造成可用能损失大的主要原因在于这个品位相差

($A_{o2} - A_1$) 很大所致。(3) 系统中相关过程产生的各种高品质的热能(A_{hi}) 优先用于对口的高温区域的热力循环系统; 各种中品位的热能(A_{mi}) 优化用于对口的中低温区域的热力循环系统或提供给吸收中温热量的过程; 各种低品位的热能(A_{li}) 优化提供给吸收低温热量的过程或作为有效热输出供热用途。(4) 系统流程(包括质量流和能量流) 和主要独立变量同步设计优化, 这需要通过大量的反复迭代的模拟分析来完成。

3.3 能量转化与污染物控制一体化

研究表明, 化石能源动力系统控制系统污染物排放、特别是温室气体 CO_2 排放问题的最有效途径是在污染物产生前或产生过程中脱除。故应打破传统的“先污染后治理”的能源利用模式, 将物质与能量转化利用过程与污染物控制过程一体化。即从掌握能源转换系统中 CO_2 的形成、反应、迁移、转化机理出发, 把能源转化与温室气体控制一体化, 这是多联产系统集成的又一个原则思路。如图 2 所示, 特别重视在原料转化处理过程阶段中控制污染物(如 SO_x 、 NO_x 、 CO_2), 因为这时污染物相对集中、浓度高, 易于处理, 可以用较低的能耗实现污染物的分离回收。另外, 还关注把产生污染的燃烧过程和污染物控制过程一体化结合, 寻求更低能耗的控制 CO_2 途径。

系统集成时, 可按下列设计思路来最大程度体现这个原则:

(1) 分离与处理 CO_2 要在它未被其它气体(氮) 稀释时进行, 否则相关能耗将无法承受。(2) 控制

系统 CO_2 排放要从源头抓起, 通过合成煤气组分的定向转移, 使碳组分更多供给生产化工产品需要, 而更多氢组分供给动力系统燃烧, 从而使系统 CO_2 总的排放量大为减少。(3) 把合成煤气按既定的目标进行处理, 并要针对不同燃料组分设计相关热力循环及其 CO_2 控制策略。按组分对口的思路, 设计不同热力循环组合也是控制与处理 CO_2 的一条有效途径。(4) CO_2 控制问题的难点在于 CO_2 分离过程将伴随无法承受的能耗。循环创新对系

变化, 多联产系统相对于分产系统的节能率在 1% ~ 18% 范围内变化。对并联型来说, 早期简单的系统只是将分产流程作为不变整体进行联合, 主要是回收化工过程弛放气用作动力系统的燃料, 性能提升潜力非常有限(相对节能率 1% ~ 3%)。后来, 提高化工流程与动力两侧的综合热整合程度和化工生产工艺供能水平(如取消自备电厂), 并综合优化两个用能系统匹配, 使其相对节能率可以从 1% 提升到约 7%。串联型相对于并联型的最主要区别在于打破了分产流程的基本结

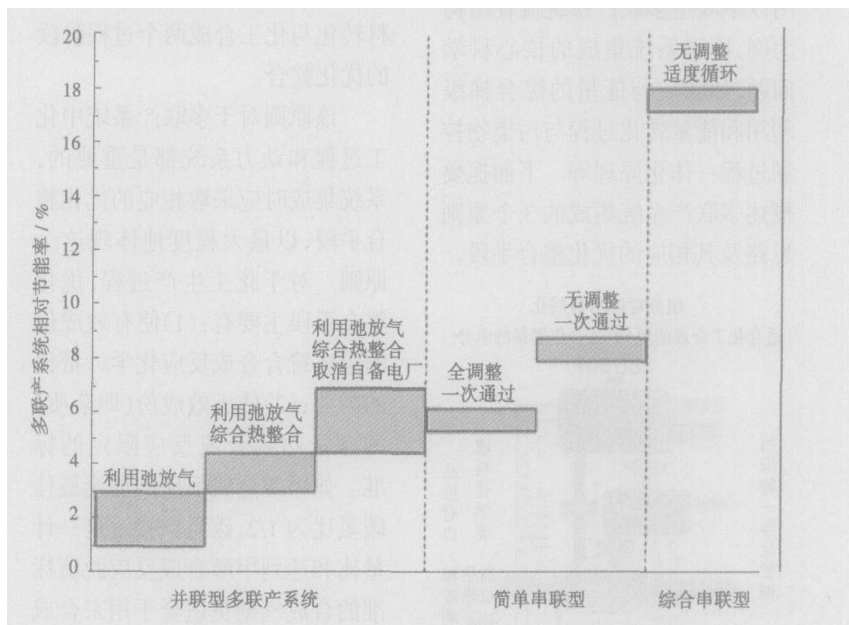


图 3 不同集成优化类型多联产系统性能提升情景

统控制 CO_2 常会带来革命性的影响, 燃烧过程革新常常成为新系统集成中的一个突破口。

研究表明, 采用不同集成优化技术路线的多联产系统, 体现上述的集成原则程度不同, 因而性能提升的差异很大。图 3 以煤气化为源头的甲醇动力多联产系统为例, 表示了不同集成优化类型的系统性能提升情景。从图中可见, 随着系统结构的集成优化

构, 因而系统集成优化效果更好。如简单串联型系统以一次通过代替未反应气全循环, 并取消了合成气组分调整单元, 使系统相对节能率提高到 5% ~ 9%, 比高集成度的并联型系统性能还好一些。而综合串联型系统采用“无合成气成份调整、未反应气适度循环”的集成优化策略, 系统相对节能率则有更大程度提升(15% ~ 18%)。

4 多联产系统类型与典型

实例

通常,多联产系统是由热工、化工与化学反应以及污染物控制等过程组成。对集成系统的过程单元与部件的划分和界定比较灵活,可以根据不同情况有所不同。一般,将针对不同功能目标和应用条件,基于能的综合梯级利用等系统集成机理,选择不同过程进行系统集成与优化整合,以实现不同的系统功能,从而集成出各种各样的多联产系统。所以,多联产系统会有很多类型,而且有多种分类的方法,如:(1)从输入的能源资源类别分,有:煤基、天然气基、可再生能源基以及多能源互补等基本形式的多联产系统。(2)从输出的产品种类分,有:甲醇—动力多联产系统、二甲醚—动力多联产系统、合成氨—动力多联产系统、醇醚—动力多

多联产系统。而从系统集成理论角度看,更倾向于后一种分类方法,它也包容了前两种分类的思路。下面侧重介绍不同集成优化类型的典型系统及其实例与特点。

4.1 简单并联型多联产系统

并联型系统是指化工流程与动力系统以并联的方式联接在一起,制备单元生产的合成气平行地供给化工生产过程和动力系统。它没有突破分产流程各自独立追求成分转化产品产率与能量转换利用效率的基本格局,基本上没有打破原来分产流程的固有结构,系统优化整合侧重于物理能范畴。其主要特点:(1)化工流程与动力系统之间是平行地联接整合。(2)联产系统中的化工生产流程与分产化工流程变化不大,仍然追求最大的产品产率。(3)动力系统燃料气主要由合成气制备单元直接供给,少量利用化工过程产生的弛放气。

绝大部分燃料气也直接来自于气化炉产生的合成气,系统整合的主要措施是回收化工过程弛放气用作动力系统燃料。如图4所示为山东兖州集团建设的多联产系统,连接化工流程与动力系统之间的最主要的整合措施是把甲醇合成单元的弛放气回收后作为燃气轮机单元的燃料。此外,两个用能系统之间没有其它更为紧密的关联,能量利用的改善也有限,节能效果低于2%。因此,这种类型系统为相对独立的化工过程和热工过程的简单联合,从严格的学术定义而言,它不属于真正意义上的多联产系统。

4.2 综合并联型多联产系统

它是在简单并联型基础上通过综合优化整合改进而成,其主要整合措施是对两个用能系统综合优化和更加完善的物理能综合梯级利用(热整合)。与简单并联型多联产系统相比,它更加关注化工侧与动力侧的综合优化,一方面注意两过程系统匹配;另一方面,突出完善两系统的热整合,所有化工工艺过程的能量需求均由动力系统对口的热能来满足,强调取消化工流程的自备电厂,在更大的范围内基于“温度对口、梯级利用”的原则实现热能的综合梯级利用。这样,它在回收弛放气的基础上,采用废热锅炉回收混合气余热、甲醇合成反应副产蒸汽送往动力侧做功、利用低温抽汽满足精馏单元热耗等措施,实现系统更完善的热整合,以进一步提升系统性能。同时,由于取消自备蒸汽电厂,它可以避免蒸汽循环燃烧过程的高熵损。通过上述综合优化整合措施,综合并联型系统的节能率有较大幅度提升(接近7%)。

4.3 简单串联型多联产系统

简单串联型系统中化工侧与动力侧基本上相互独立,其中化工流程多沿用了分产流程的合成气成份全调整、未反应气全循环的传统技术路线,而动力系统的

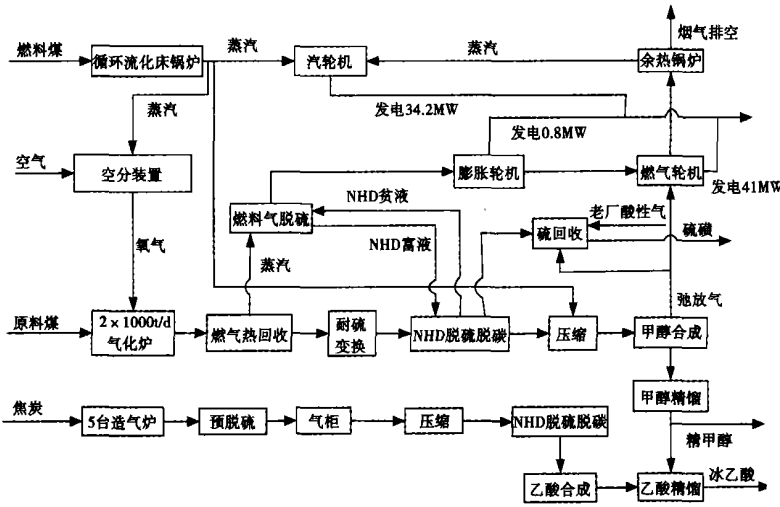


图4 兖矿集团的多联产系统示意图

联产系统、氢燃料—动力多联产等。(3)从系统集成优化及其流程结构分,有:简单并联型、综合并联型、简单串联型、综合串联性以及串并联综合型等基本类型的

串联型系统是指化工流程与动力系统以串联的方式联接在一起,合成气先经历化工生产流程,部分组分转化为化工产品,没有转化的剩余组分再作为燃料送往热力循环子系统。与并联型系统相比,串联型系统集成的最突出特征在于打破了分产流程的基本结构。其主要特点:(1)化工流程与动力系统之间是上游与下游的串联整合。(2)联产系统中的化工生产流程与分产化工流程有较大的区别,不追求将进入化工流程的合成气全部转化为产品。(3)动力系统燃料气常不是直接由气化炉产生的合成气,其组分还要由化工生产流程来决定。

简单串联型系统主要特征是“合成气组分的无调整”和“未反应气的一次循环通过”。即以一次通过代替未反应气全循环,进入化工流程的原料气不全部转化

DME 合成单元进行 DME 合成。反应完成后含有 DME、甲醇和水的混合物进入 DME 分离单元进行分离,未反应的甲醇循环返回 DME 合成单元,从甲醇分离单元出来的气体供给燃气轮机。由于取消了成份调整过程,简单串联型多联产系统可以有效降低合成气制备过程与粗产品精馏单元的能耗,其系统相对节能率约 7%。

4.4 综合串联型多联产系统

综合串联型多联产系统是在简单串联型基础上通过综合优化整合发展出来,其主要特征是无成份调整的合成反应新气制备方式与未反应气适度循环利用方式综合优化整合。在系统集成时,没有停留在分产固有流程的层面上,一方面保持了无合成气成份调整的能量利用优势,并在此基础上利用反应气适度循环能够有效地提高组分转化水平的特点,

由气化炉产生的粗煤气经降温净化后直接作为反应新气合成甲醇,未反应气被分为循环气与未循环气两部分,循环气与合成反应新气混合后再次进入合成反应器反应,未循环气则在经过预热、膨胀后送往动力系统作为燃料气燃烧。它采用无成份调整方式,保持了合成反应新气制备子系统损失低的突出优势,具有较高的能量利用水平;针对一次通过方式成份利用不充分的缺陷,采用未反应气适度循环的方式,有效地提高全程转化率,从而将合成反应新气的有效成份尽量转化为化工产品,而确实难以转化为化工产品的组分再以未循环气的方式送往动力系统。它同时打破合成气成份调整度与有效成份利用率的限制,系统相对节能率得以较大幅度提升(12%~15%)。

4.5 串并联综合型多联产系统

它是基于综合两者(并联型和串联型系统)优势的思路而提出一种新型多联产系统。大量研究表明,串联型系统能源转换利用更合理、具有更好的节能效果,但由于化工过程与动力系统之间结合过于紧密,而存在运行稳定性、安全性与灵活性不足等缺陷;并联型产系统虽然节能效果不理想,但由于两系统相对独立,其运行稳定性、安全性以及对负荷的适应性等都不错。串并联综合型系统综合包容了合成气并串联分配、组分合理调整、适度循环以及能量综合梯级利用等系统集成优化整合手段,从而保留并联与串联型系统的优点,缓解它们的缺陷,具有更好的多目标综合性能。图 6 为串并联综合型多联产系统示例。从图中可见,它包容了并联型系统与串联型系统的流

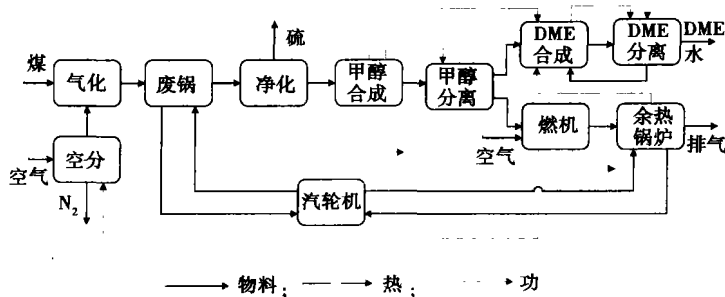


图 5 二甲醚—动力多联产系统示意图

为化工产品,而且取消了在分产流程中认为必需的合成气成份调整单元。图 5 为二甲醚动力多联产系统示意图(典型的简单串联型系统)。它先将煤气化产生合成煤气,然后采用一次通过甲醇合成工艺(MS)生产甲醇,从甲醇合成单元出来的物料在甲醇分离单元进行分离,未反应的可燃性气体以进入燃气轮机燃烧做功。液相组分甲醇直接进入

依据成份利用与能量利用之间的相互影响规律,避免过度追求有效成份利用率的提高,进行组分转化与能量转换利用之间的优化整合,选择了未反应气适度循环。即通过组分转化与能量转换利用的有机耦合,更好地体现多联产系统集成原则思路。

图 1 为本研究集体首次提出的无合成气成份调整、未反应气适度循环的综合串联型多联产系

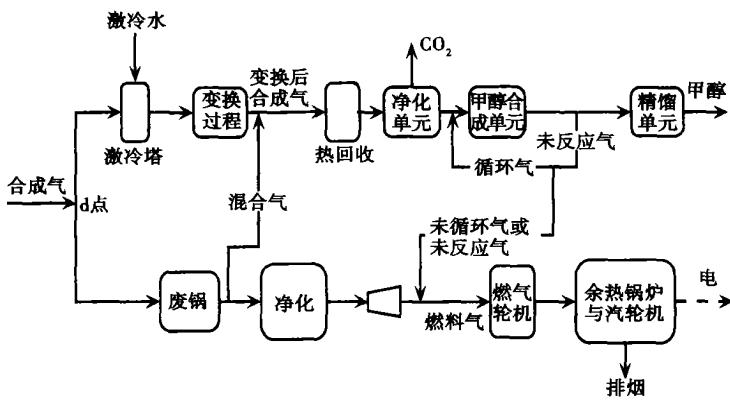


图6 串并联综合型多联产系统示意图

程结构,由气化炉产生的合成气分别进入化工流程与动力系统,而进入化工流程的合成气并不全部转化为化工产品,而是采用一次通过或部分循环等合成方式,未反应气或未循环气送往动力系统作为燃料。此时,动力系统燃料既有来自于气化炉的合成气,也有来自于化工流程的未转化气。它的突出优势在于既在一定程度上保留了串联型系统节能效果明显的优势,又具有并联型系统变工况性能好、运行灵活等长处。

5 结束语

(1)本研究依托国家973计划开展多联产系统集成理论研究,概述化工动力多联产系统的基本概念与特点,指出它不是两种用能系统的简单叠加,而应该是基于一定原则思路有机整合的一体化联产系统,其本质特征是在多联产新概念基础上的系统集成。

(2)研究提出的多联产系统集成的主要原则思路:“组分对口、分级转化”,“品位对口、梯级利用”以及“能量转化与污染物控

制一体化”等,并概述了为充分体现这些原则思路而采取的优化整合手段。

(3)还从系统集成构成层面,把多联产系统分为5类:简单并联型、综合并联型、简单串联型、综合串联型和串并联综合型等基本形式,列举实例,并分析其主要特征等。

参考文献:

- [1] 蔡睿贤,金红光,林汝谋. 21世纪100个交叉科学难题——能源动力系统与协调相容的难题[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [2] HOLDREN JOHN P. The federal role in international cooperation on energy innovation[M]. Washington: Executive Office of the President of United States, 1999.
- [3] 金红光, 王宝群, 刘泽龙, 等. 化工与动力广义总能系统的前景[J]. 化工学报, 2001, 52(7): 565—571.
- [4] 金红光, 高林, 郑丹星, 等. 煤基化工与动力多联产系统开拓研究[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(4): 397—400.
- [5] 林汝谋, 金红光, 蔡睿贤. 新一代能源动力系统的研究方向与进展[J]. 动力工程, 2003, 23(3): 2370—2376.
- [6] 倪维斗, 李政, 薛元. 以煤气化为核心的多联产能源系统—资源/能源/环境整体优化与可持续发展[J]. 中国工程科学, 2000, 2(8): 59—68.
- [7] HOLDREN JOHN P. Report to the president on federal energy research and devel-

opment for the challenges of the twenty-first century[R]. Washington: PCAST, 1997.

- [8] WILLIAMS ROBERT H, LARSON ERIC D. A comparison of direct and indirect liquefaction technologies for making fluid fuels from coal[J]. *Energy for Sustainable Development* 2003, 7(4): 103—129.
- [9] YAMASHITA KEL, BARRETO LEONARDO. Integrated energy systems for the 21st century: coal gasification for co-producing hydrogen, electricity and liquid fuels[R]. Laxenburg Austria: IIASA, 2003.
- [10] BROWN W R, FENDUTO F S. Fuel and power co-production the integrated gasification/liquid-phase methanol (LPMEOH) demonstration project[A]. *Proceedings of First Annual Clean Coal Technology Conference*[C]. Cleveland: APCL 1992. 33—48.
- [11] LARSON ERIC D, REN TINGJIN. Synthetic fuels production by indirect coal liquefaction[J]. *Energy for Sustainable Development*, 2003, 7(4): 79—102.
- [12] 麻林巍. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统研究[D]. 北京: 清华大学, 2003.
- [13] 高林. 煤基化工—动力多联产系统开拓研究[D]. 北京: 中国科学院, 2005.
- [14] 林汝谋, 金红光. 以燃气轮机为核心的多功能能源系统概念与集成机理[J]. 燃气轮机技术, 2005, 18(4): 1—10.
- [15] 韩巍, 金红光, 林汝谋. 化石燃料化学能释放的新认识[J]. 自然科学进展, 2005, 15(1): 84—89.
- [16] JIN HONG GUANG, HONG HUI, WANG BAO QUN, et al. A new principle of synthetic cascade utilization of chemical energy and physical energy[J]. *Science in China Ser E Engineering & Materials Science*, 2005, 48(2): 163—179.
- [17] 陈斌, 高林, 金红光. 二甲醚/动力多联产系统初步研究[J]. 中国工程热物理学报, 2004, 25(5): 741—744.
- [18] 王宝群. IGCC系统控制CO₂的过程机理和一体化集成[D]. 北京: 中国科学院, 2004.

(何静芳 编辑)

化工动力多联产系统及其集成优化机理 = **Chemical Engineering Power Polygeneration System and Its Integrated Optimization Mechanism**[刊, 汉] / LIN Ru-mou, JIN Hong-guang, GAO Lin (Research Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 331 ~ 337

The theory of system integrated optimization represents a most important scientific issue playing a key role in the development of a polygeneration system. In this regard, relevant research has been carried out under the support of a national major scientific research project. Research results achieved at a substage are described by the authors, including: the basic concept, intrinsic characteristics and specific features of a chemical engineering power polygeneration system along with an exposition of the approaches proposed for the study of the system integration principles as well as the optimization integration means embodying such principles. Moreover, the polygeneration system has been classified into five basic categories on the basis of the system integration structured layers, namely, simple parallel-connected type, synthesized parallel-connected type, simple series-connected type, synthesized series-connected type and series and parallel-connected synthesized type etc. Some specific cases with an analysis of their main characteristics etc. are presented. **Key words:** polygeneration system, chemical engineering and power, integrated optimization, basic types

活性炭床加微波辐射脱硫脱硝的研究 = **A Study of the Desulfuration and Denitration on Active Carbon Beds Provided with Microwave Irradiation**[刊, 汉] / MA Shuang-chen, ZHAO Yi, MA Xiao-ying, et al (Environment College under the North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 338 ~ 341

A brief description is given of the microwave heating principles and the development of microwave chemistry along with an overview of microwave-based desulfuration and denitration. By the use of a microwave device and active carbon, a study of the simulation of flue gas with a simultaneous desulfuration and denitration has been conducted. With the help of this technology, 96% of the carbon monoxide and sulfur dioxide can be directly decomposed into environment-friendly nitrogen as well as valuable and recoverable elementary sulfur. Analyzed is the microwave-induced catalytic reduction-based desulfuration and denitration mechanism, pointing out that the microwave reduces the activation energy of the above-cited removal reactions. This indicates that the microwave not only promotes the process of reactions with its thermal effect but also gives full play to its catalytic action. **Key words:** microwave, desulfuration, denitration, induced catalytic reduction, active carbon

影响冷热电联产系统经济性因素的灰关联分析 = **An Analysis of the Ash Correlation of Various Factors Influencing the Cost-effectiveness of a Combined Refrigeration, Heat and Power Trigeneration System**[刊, 汉] / FENG Xiao-ping (Civil Engineering Department of the Jiangnan University, Wuxi, China, Post Code: 214122), ZHANG Bei-hong (Shanghai Academy of Architectural Science, Shanghai, China, Post Code: 200032), LONG Wei-ding (Sino-German Engineering College under the Tongji University, Shanghai, China, Post Code: 200092) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 342 ~ 344

Multifarious are the factors influencing the operational efficiency of a combined heat and power cogeneration system. To identify the major influencing factor and the dominant/subordinate relationship from among a variety of factors constitute an important task for the cost-effectiveness analysis of a system. Analyzed are the factors influencing the cost-effectiveness of a gas turbine based heat and power cogeneration system in Shanghai region by adopting a mathematic model involving an ash correlation analysis in an ashy color theory. The results show that according to the current price of natural gas, electricity purchase and sales price in Shanghai City, one can conclude that among the five factors, namely, gas turbine efficiency, investment outlays for gas turbines, price of natural gas, electricity purchase price and sales price, the natural gas price is the most conspicuous factor having a maximum impact on the cost-effectiveness of the gas turbine based heat-and-power cogeneration system. **Key words:** Gas turbine, heat and power (refrigeration) cogeneration, cost-effectiveness, ash correlation analysis, correlation degree

前缘气膜孔对涡轮静叶冷却效果影响的数值模拟 = **Numerical Simulation of the Impact of Leading-edge Gas-film Pores on Cooling Effectiveness in Turbine Stator Blades**[刊, 汉] / YANG Fan, ZHENG Hong-tao, LI Zhi-ming (Power and Nuclear Energy Engineering College under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(4). — 345 ~ 349