

甲醇/电联产系统中甲醇合成与 精馏模拟及变负荷研究

王明华, 李 政, 冯 静, 倪维斗

(清华大学 热能工程系, 北京 100084)

摘 要: 整体煤气化联合循环(IGCC)作为最有前景的清洁煤发电技术之一, 将 IGCC 系统与甲醇合成系统耦合, 不仅可以提高系统的负荷调节能力, 同时也能改善 IGCC 电站的经济性。通过 ASPEN 建立了 C301 型低压列管式气相甲醇合成和三塔精馏的流程模拟, 提出了基于分流比与循环比的变负荷调节策略, 借助四象限图, 展示了在不同的分流比与循环比的情况下, 甲醇变工况范围和电力负荷的调节能力, 并通过改变精馏各塔的再沸与冷凝负荷实现了精馏过程的变负荷调节。

关 键 词: 甲醇/电联产; IGCC; 甲醇合成; 甲醇精馏; 变负荷

中图分类号: TK01, TQ214 文献标识码: A

引 言

整体煤气化联合循环(IGCC)被认为是最有发展前景的清洁煤发电技术之一。目前, 制约 IGCC 技术发展的主要因素是其经济性和可靠性。IGCC 电站由于投资成本高、燃料热值低和气化系统操作灵活性差, 因而一般认为应该工作在基本负荷下^[1]。但是, 由于电网要求电站要具有一定的调峰能力, IGCC 电站若工作在部分负荷下, 其经济性差、负荷调节范围窄的问题就更为突出。IGCC 联产甲醇系统也即煤基多联产系统为解决这两个问题提供了方向, 它所面临的一个问题是: 电力系统因为电网的要求要变负荷运行, 而传统化工系统则希望尽量保持在稳定的负荷下连续运行, 这两种运行方式不同的系统耦合得到的新系统必然具有新的系统运行特性, 对这种新的运行特性也即多联产系统变工况特性的研究对于系统在工业化后的可操作性和运行性具有更大的意义。

本文在一定的甲醇电力组合方式下, 通过对甲醇合成和精馏过程进行 ASPEN 模拟计算, 分析了反应压力、空速 v (空速为单位反应体积所能处理的标准状态下反应混合物的体积流量, 单位为 h^{-1})、循环比 r (循环比为循环回反应器入口的合成尾气与反应器入口新鲜气的比值)和分流比 x (分流比为直接通往甲醇合成系统的合成气占总的合成气的比例)对甲醇生产能力、精馏能耗等的影响; 探讨了分流比和循环比是实现电力负荷调节的两种策略; 在此基础上研究了当多联产系统中满足电力负荷改变时, 甲醇合成与精馏过程该如何调节, 以及对电力负荷具有多大的调节能力; 从而为拓展甲醇/电多联产系统的研究和实现工业化的应用提供借鉴作用。

1 甲醇合成模拟与变负荷调节策略

甲醇合成的工业生产方法最初采用的是高压法, 用锌铬催化剂, 反应温度 $360 \sim 400\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力 $20 \sim 30\text{ MPa}$ 。随着脱硫技术的发展和铜系催化剂的开发成功, 开始了甲醇的低压合成, 温度 $240 \sim 300\text{ }^{\circ}\text{C}$, 压力 $5 \sim 10\text{ MPa}$ 。低压合成不仅催化剂活性好、选择性好, 且能耗低、成本低^[2]。低压甲醇合成塔主要有 ICI 冷激式、Lurgi 列管等温式等形式, 后者具有出口甲醇含量高、可副产蒸汽等优点。以下将对国内使用较广泛的 C301 型 $\text{CuO-ZnO-Al}_2\text{O}_3$ 催化剂低压列管式气相甲醇合成工艺进行 Aspen 模拟。

选择 RPlug 活塞流反应器模块, 反应动力学部分由 Fortran 程序编制的 User Subroutine 计算; 反应动力学采用考虑 CO 、 CO_2 加氢合成甲醇平行反应的双速率宏观模型^[3]。由于实际反应器中传递过程的

收稿日期: 2007-10-26; 修订日期: 2007-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展计划基金资助项目(2005CB221207); 国家自然科学基金重大研究计划基金资助项目(90210032)

作者简介: 王明华(1980-)男, 江西九江人, 清华大学博士研究生。

© 1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

影响不容忽略,将工业反应器中的实际速率与动力学方程计算速率的偏离,用催化剂活性系数 COR (COR 为反应器内实际反应速率与由动力学方程算得的反应速率之比)进行校正,而活性系数会随着催化床深度而降低。在此仅根据实际的工业数据,对整个床层求取平均 COR,以对 CO 和 CO₂ 的整个反应过程进行动力学校正。

1.1 工艺介绍

低压气相甲醇合成工艺如图 1 所示。原料气与循环气经联合离心式压缩机(用背压式蒸汽透平驱动)加压至所需的压力,再与合成塔出塔气体换热到 230℃左右后进入合成塔,在催化剂床层内合成甲醇,反应放出的热量经管壁传给管间的沸腾水,产生 4 MPa 的蒸汽,用蒸汽驱动离心式压缩机,背压低压蒸汽作为甲醇精馏的热源。含有甲醇蒸汽、水蒸汽和少量反应副产物以及未反应的 H₂、CO、CO₂ 和惰性气体的出塔气经过与入塔气、锅炉给水换热器和水冷器冷却到 40℃后,进入甲醇气液分离器,分离下来的粗甲醇进入闪蒸槽闪蒸溶解气后送后续的精馏工段。甲醇气液分离器顶部出来的气体部分放空,以维持系统中惰性气体的浓度;部分循环与新鲜气混合加压再次进入合成塔。考虑到与动力部分的耦合,在此可以改变循环气量,让部分未反应气体连同闪蒸汽和放空气一起进入燃气轮机燃烧发电。

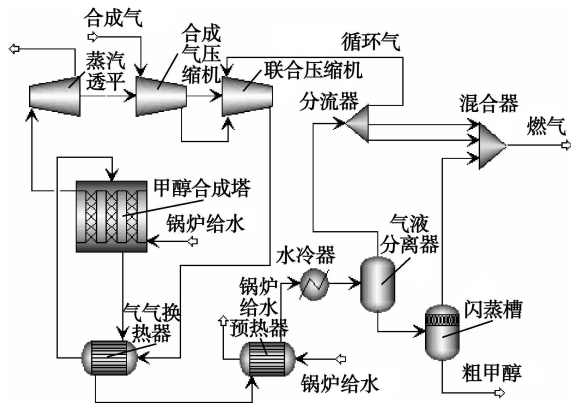


图 1 甲醇合成工艺流程图

1.2 模型操作参数设计

1.2.1 工艺参数的选择

合成气来自 Shell 气化炉得到的气化煤气经过变换和脱硫脱碳后的气体^[4],压力 3.2 MPa,温度 40℃,摩尔百分比组成如表 1 所示。

将循环比作为调节变量,以研究化动比对多联产系统性能的综合影响,故循环比取 6 个值,即: 0、

1、2、3、4 和 5。操作空速不仅影响原料的转化率,而且也决定着生产能力。铜基催化剂上,一般要求气体空速在 8 000~12 000 h⁻¹之间。

表 1 Shell 气化煤气摩尔组成^[4] (%)

	数 值
CO	28.63
H ₂	64.24
CO ₂	1.82
CH ₄	0.04
AR	0.92
N ₂	4.34
H ₂ O	0.001 5

1.2.2 反应器条件的确定

为了研究反应压力对列管式甲醇合成塔生产能力、单位产品原料和能量消耗等的影响,压力取 5、8 和 10 MPa 3 个值;催化剂层中的压差为 0.3~0.4 MPa^[5]。合成塔壳程的锅炉给水是自然循环的,通过控制汽包压力来保持恒定的反应温度,变化 0.1 MPa,相当于 1.5℃。一般来说,在一定组成的情况下,随着操作压力的增加,最佳合成温度也略有上升,这里为了分析问题的简便,忽略这种变化,对于 5~10 MPa 的操作压力,都取 250℃作为反应温度。

假定反应器内径取为 3 m,所用的 C301 催化剂的颗粒密度 ρ_{cat} 为 2 960 kg/m³,按照工程经验,装填的催化剂的堆积密度为 1 500 kg/m³,则空隙率 θ 为 0.493;列管采用正三角排列方式,所有管截面积占反应器截面积的 71.1%;COR 取 0.8。

1.3 模拟结果与分析

图 2 展示了在不同压力和空速下,甲醇生产能力与循环比的关系。从图中可以看出,甲醇生产能力随着循环比的增大反而降低,这是因为在固定空速的情况下,循环比越小则新鲜原料气消耗就越大,而新鲜原料气又具有最佳的氢碳比组成,故甲醇产率就越大;但由此带来的问题就是吨甲醇功耗增加,气化规模也将增大,从而实际上为了充分利用宝贵的合成气,一般都尽量打循环以提高 H₂ 和 CO 的转化率。另外,随着合成压力的增大,装置的生产能力将有较大的提高:5 MPa 时,最小产能 146 kt/a,最大产能 243 kt/a;8 MPa 时,最小产能 164 kt/a,最大产能 452 kt/a;10 MPa 时,最小产能 167 kt/a,最大产能 566 kt/a。且随着循环比的增大,相同空速不同压力下的产能越来越接近。在同一压力下,随着空速的增加,装置的产能也是增大的,但低压时增加的幅度

不如高压, 主要是因为 CO 转化率在高压时较大。当空速由 $8\,000\text{ h}^{-1}$ 提升到 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 所增加的产能大于由 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 提升到 $12\,000\text{ h}^{-1}$ 所增加的产能, 这是因为随着空速的提高, 气量增加带来的产能增加速率不如 CO 转化率下降带来的产能下降速率大。

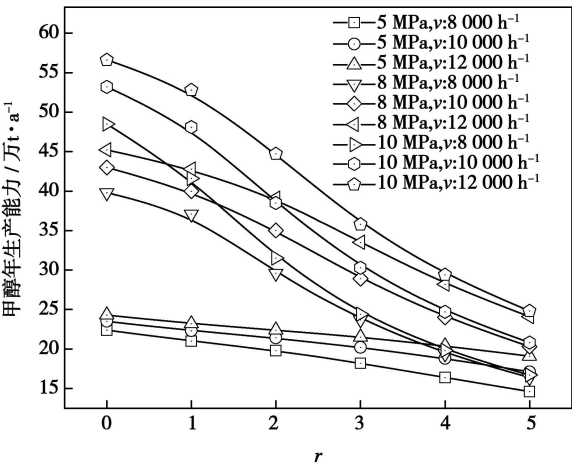


图 2 甲醇生产能力在不同压力和空速下与循环比 r 的关系

图 3 展示了吨甲醇功耗在不同压力和空速下随循环比变化的关系。从图中可以看出, 随着循环比的增加, 新鲜原料气消耗将减少, 吨甲醇的压缩功耗先减后增, 存在一极小值; 这先是由于新鲜原料气压缩功耗降低, 而后随着循环气量的增加, 联合压缩机的功耗将增大; 且随着循环比的增大, 同一压力、不同空速下的吨甲醇功耗趋于一致。

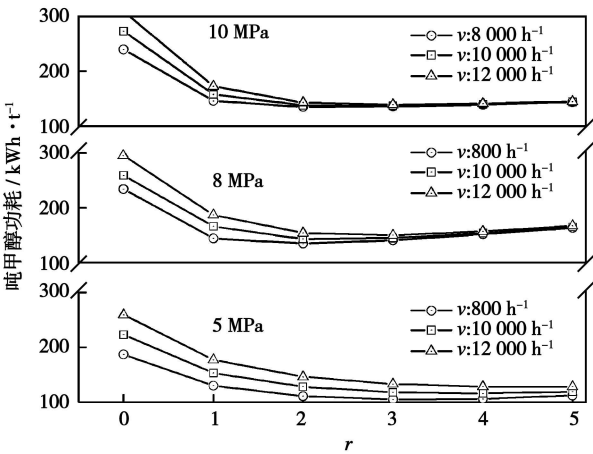


图 3 吨甲醇功耗在不同压力和空速下与循环比 r 的关系

甲醇合成来说是十分不利的, 不仅降低反应速率, 而且增加了动力消耗。由于所处理的新鲜原料气中惰性气体的含量较高 (5.3%), 为了保持一定的惰性气体含量, 放空气量就需要很大, 因而循环比不能太高; 另外从图 3 可知循环比过高会增加吨甲醇的功耗。为了既能使甲醇合成在一定的循环比下操作以节省原料气的消耗, 又能将不循环的新鲜气和大量放空以保持惰性气体含量的弛放气进行充分的利用, 多联产系统将是较优的选择。多联产系统研究的基础就是要建立各个单元过程模型, 分析典型系统的组合方式, 耦合内部能量, 解决化工与动力的变负荷调节策略。

1.4 基于分流比和循环比的变负荷调节策略

变负荷调节问题的提出就是因为动力侧不是长期在基本负荷情况下运行, 而是根据电网的需求进行调整, 因此应具有较大的负荷调节能力。而对于化工侧, 正常运转之后基本上是一个稳态过程, 由于设备和经济性的制约, 不希望有负荷的变动, 因此其调节范围较小, 对于甲醇合成系统而言, 一般为 $80\% \sim 110\%$ 。

以下就甲醇合成的额定工况为压力 5 MPa , 空速 v 为 $10\,000\text{ h}^{-1}$, 循环比为 3 的系统作为基础案例, 对甲醇/电联产系统进行变负荷调节策略的初步探讨。为保持气化炉生产能力不变, 当动力侧需要在部分负荷下运行时, 则化工侧就需超负荷运行, 而各化工设备的超负荷调节范围为 $100\% \sim 110\%$ 。故通过改变分流比 x 和循环比 r , 使空速 v 保持在 $10\,000 \sim 11\,000\text{ h}^{-1}$ 之间, 就可以得到动力侧变负荷能力。在考虑经济性和可靠性等方面的因素下, 得到的甲醇/电联产系统负荷调节策略组合方式如图 4 所示。

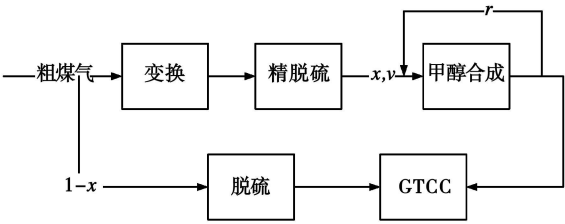


图 4 甲醇/电联产系统变负荷调节策略组合方式

通过计算, 图 5 展示了循环比和分流比两种调节策略对甲醇合成变工况范围和电力负荷调节范围关系的 4 象限图。从图可以看出, 相同空速下, x 与 r 是一一对应的, 为了实现负荷的调节, 既可以调节 x , 也可以调节 r , 但只要定了其中一个, 则另一个也

被确定了。在第一象限中,给出了在额定工况和变工况下的两条等空速线,从而确定了调节策略中循环比和分流比的对应关系,两条等空速线即是通过循环比和分流比调节负荷的边界。在第二象限中,给出了在一定的分流比和相应的循环比的情况下,甲醇合成变工况的范围。与基础案例相比,在空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$,循环比小于 3,分流比大于 0.48 时或者在空速为 $11\,000\text{ h}^{-1}$,循环比小于 3.6,分流比大于 0.46 时,甲醇生产负荷是增加的,最大可以增加 12.5% 的产量,对应的分流比为 1,循环比为 1.12;而当循环比和分流比变化情况相反时,甲醇生产负荷是减少的,究其原因循环比增加和分流比减少时,导致了惰性气体含量增加,从而使得 CO 转化率下降。在第三象限中,给出了甲醇合成变工况范围与电力负荷变化范围对应的关系,可以看出,随着甲醇产量增加,电力输出负荷减少。在第四象限中,给出了电力负荷变化范围随循环比和相应的分流比的关系,在空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 和循环比大于 3 时,电力生产负荷是增加的;而当空速为 $10\,000\text{ h}^{-1}$ 时,电力生产负荷在所研究的循环比和分流比的范围内都是降低的,电力调节负荷最大可以下降 11.2%。

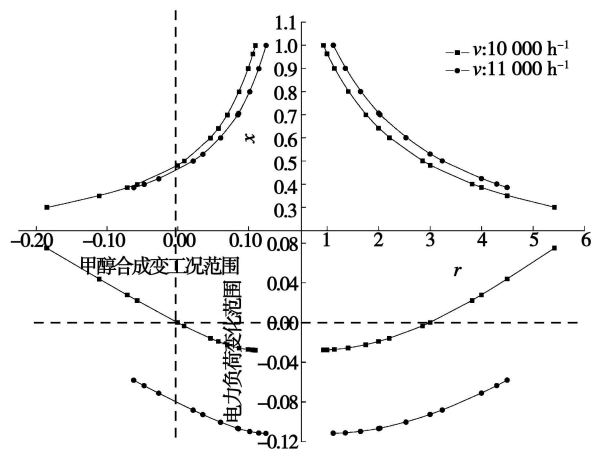


图 5 循环比和分流比对甲醇合成和电力负荷变化范围关系

2 甲醇精馏模拟与变负荷讨论

甲醇合成不论采用何种催化剂,均受其选择性的限制和反应压力、温度及合成气组成的影响。为了得到高纯度的甲醇,必须对粗甲醇进行精馏提纯。根据对甲醇质量要求不同,精馏工艺可分为单塔、双塔和三塔等流程。由于单塔流程多用于燃料级甲

醇,而双塔流程对于生产规模较大的甲醇厂来说能耗太高,故以下仅对三塔双效流程进行 ASPEN 模拟,以得到甲醇精馏过程的能耗指标和分析应对合成过程负荷变化的变工况特性。三塔流程最大的特点就是利用加压塔塔顶蒸汽冷凝热作常压塔塔底再沸器热源,从而减少蒸汽消耗和冷却水消耗。

2.1 流程介绍

图 6 为甲醇三塔精馏工艺流程图。

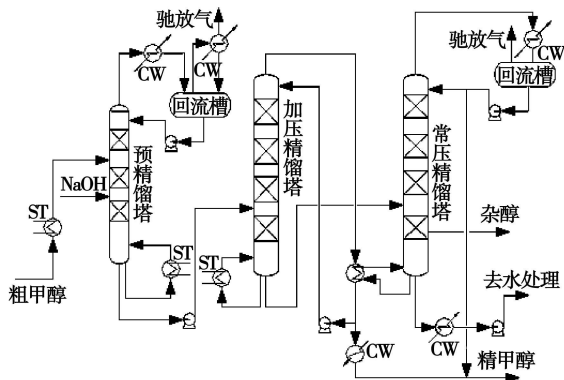


图 6 甲醇三塔精馏工艺流程

来自合成工序的粗甲醇经粗甲醇预热器加热至 $70\text{ }^{\circ}\text{C}$,然后进入预精馏塔精馏。塔顶气经预塔两级冷凝器冷却至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后部分冷凝,冷凝液流入预塔回流槽,由预塔回流泵加压后作预精馏塔回流液,不凝气驰放。加入稀的 NaOH 溶液以中和粗甲醇中的有机酸,控制预精馏塔塔底甲醇溶液的 pH 值在 8 左右。

预精馏塔塔底排出液由加压塔给料泵加压后送往加压精馏塔精馏,加压精馏塔操作压力约 0.70 MPa 。塔顶甲醇蒸汽温度约 $122\text{ }^{\circ}\text{C}$,去常压精馏塔再沸器作热源,冷凝液一部分由加压塔回流泵加压后作加压精馏塔回流液,另一部分经冷却后送精甲醇槽。

加压精馏塔塔底排出液送往常压精馏塔。塔顶甲醇蒸汽经常压塔冷凝器冷却至 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 后,冷凝液流入常压塔回流槽,由常压塔回流泵加压后一部分作常压精馏塔回流液,另一部分送精甲醇槽。常压塔再沸器热源为加压精馏塔塔顶甲醇蒸汽。常压精馏塔塔底排出的含少量甲醇的废水去水处理过程,侧线采出杂醇。

2.2 粗甲醇精馏过程模拟

2.2.1 工艺参数的计算基础

最小回流比 $R_{\min}$ 采用 Underwood 法计算^[6],操作回流比 R 取 1.3 倍的 $R_{\min}$ ^[3]。最小理论塔板数 $N_{\min}$ 采用 Fenske 方程计算,再依据 Gilliland 曲线确

定理论塔板数 N_T , 最后根据精馏塔的塔板效率 E_0 得到实际塔板数 N 。根据工程经验, 预精馏塔的塔板效率 E_0 为 55%~65%, 加压精馏塔和常压精馏塔的塔板效率为 50%~60%。气液相平衡的计算采用 Wilson 方程。

2.2.2 工艺参数的确定

来自上一节案例的粗甲醇进料组成如表 2 所示, 温度 40 ℃, 压力 0.15 MPa, 流量 838.8 kmol/h。

表 2 粗甲醇的摩尔组成 (%)

	数 值
CH ₃ OH	93.67
CO	1.10
H ₂	0.09
CO ₂	0.85
H ₂ O	3.66
CH ₄	0.01
N ₂	0.38
AR	0.08
DME	0.02
C ₄ H ₉ OH	0.05
C ₂ H ₅ OH	0.10

通过计算得到各塔的塔板数和回流比如表 3 所

示。

表 3 三塔精馏各塔的计算塔板数和回流比

	塔板数		回流比	
	N_T	N	R_{min}	R
预精馏塔	25	45	0.69	0.90
加压精馏塔	42	84	1.43	1.86
常压精馏塔	42	84	1.90	2.47

2.2.3 甲醇精馏过程的 ASPEN 模拟结果

三塔流程利用加压塔塔顶蒸汽冷凝热作常压塔塔底再沸器热源, 存在一个能量匹配的问题。当加压精馏塔的再沸负荷增加时, 则塔顶蒸汽流量增大, 其冷凝热必定增加, 而作为常压精馏塔进料的塔底馏份则会减小, 那么常压精馏塔的再沸负荷也会随之减小。当加压精馏塔的再沸负荷为某值, 刚好使得加压精馏塔塔顶蒸汽冷凝热等于常压精馏塔的再沸负荷时, 即为最佳的工况匹配点。

在进行 ASPEN 模拟时, 利用加压精馏塔的 BR (BR 为再沸率, 是塔底的汽流量与塔底产品流量之比) 作为调节变量, 来对加压精馏塔与常压精馏塔的再沸负荷进行优化, 寻找最佳的工况匹配点, 模拟计算结果如表 4 所示, 最佳工况点 BR 为 3.80, 甲醇回收率为 99.1%。

表 4 甲醇三塔精馏各产品的 ASPEN 模拟参数

	预塔		加压		常压		侧线
	塔顶	塔底	塔顶	塔底	塔顶	塔底	
温度/℃	67.28	75.46	123.37	126.25	68.90	99.52	90.66
压力/MPa	0.14	0.15	0.7	0.73	0.12	0.13	0.13
冷负荷/kW	-102.97				-8108.07		
热负荷/kW	302.10		12101.44				
BR	0.04		3.80		30.92		
流量/kmol·h ⁻¹	28.31	810.48	439.59	370.89	338.99	31.78	0.12
组成(摩尔分率)							
CO	0.3256						
H ₂	0.0272						
CO ₂	0.2508						
H ₂ O		0.0378	0.0001	0.0826		0.9620	0.5751
CH ₃ OH	0.2521	0.9606	0.9990	0.9151	0.9998	0.0143	0.0731
CH ₄	0.0029						
AR	0.0238	1.01E-21					
N ₂	0.11	1.08E-21					
DME	0.0059	1.52E-12	2.81E-12	1.66E-25			
C ₂ H ₅ OH	1.08E-06	0.0010	0.0009	0.0012	2.12E-04	0.0111	0.1947
C ₄ H ₉ OH	0	0.0005	1.22E-20	0.0011	6.81E-15	0.0126	0.1571

从合成工序水蒸气透平来的背压低压饱和水蒸气参数为:温度 165.4 °C, 压力 0.7 MPa, 流量 50 685 kg/h, 它能提供的冷凝潜热为 29 781 kW。三塔精馏中预塔和加压塔一共所需要的热负荷为 17 955 kW, 也即消耗水蒸气量为 21 110 kg/h, 折算为吨甲醇精馏的理论水蒸气消耗为 0.847 t, 而每吨甲醇副产 4.0 MPa 饱和蒸汽的量在 1.36~1.66t 之间;这说明合成过程副产的 4 MPa 的水蒸气不仅可以提供合成所需要的压缩功, 还能满足精馏所需要的热量, 充分做到了能量按品质的梯级利用, 提高了能量利用率, 使得系统更加优化。

2.3 精馏过程变负荷讨论

动力过程负荷调节而引起的甲醇合成工况发生改变, 则甲醇浓度、产量等都随之发生变化, 精馏过程就需要根据新的进料情况进行相应的回流比或各塔再沸或冷凝负荷等操作参数的调整, 以满足精馏负荷改变和对甲醇产品质量的要求。根据前面的计算, 在 110% 的超负荷范围内, 精馏进料的组成变化很小, 温度一样, 利用精馏图解法计算时, 进料线(也即 q 线)的位置基本不发生改变, 故无须改变各塔的回流比;而进料量有较大的变化, 可通过改变各塔的再沸负荷和冷凝负荷来实现精馏过程的变负荷调节。

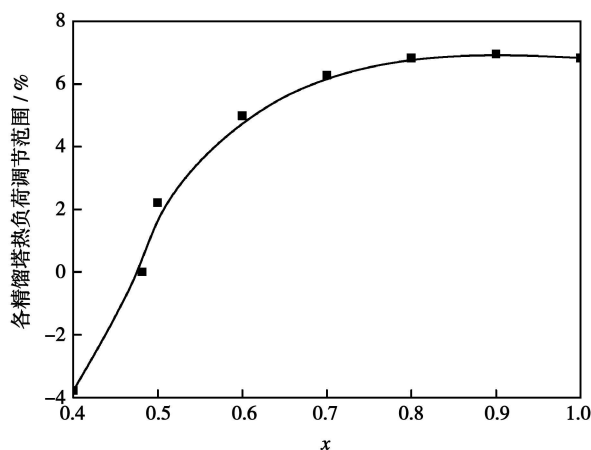


图 7 各精馏塔负荷调节与分流比 x 关系

图 7 展示了在甲醇合成处理能力为 110% 的情

况下, 各精馏塔再沸和冷凝的热负荷调节与分流比的关系。从图中可以看出, 随着分流比的增大, 精馏塔的热负荷也是增加的, 但增加的幅度愈来愈缓慢, 并且在分流比为 0.9 时达到极大值 7%。这主要是因为随着分流比的增加, 循环比是下降的, 使得 CO 转化率增加缓慢(甚至在一定值时开始下降), 必然甲醇的产量增加幅度也不大, 从而热负荷调节也越来越小。

3 结 论

(1) 基于甲醇/电联产系统, 提出了分流比与循环比对 IGCC 的变负荷调节策略和四象限图分析方法, 在甲醇合成反应器增加 10% 的处理能力时, 甲醇的产量最大可增加 12.5%, 电力最大可调负荷能力为 11.2%。

(2) 建立了 C301 型低压列管式气相甲醇合成的 ASPEN 模拟流程, 在固定空速的情况下, 甲醇生产能力随着循环比的增大反而降低;随着合成压力的增加, 甲醇生产能力有较大的提高;吨甲醇的功耗随着循环比的增加, 先减后增, 存在一极小值。

(3) 通过 ASPEN 对甲醇三塔精馏工艺进行了全流程的模拟计算, 在甲醇合成过程处理能力增大的情况下, 各精馏塔的热负荷是增加的, 但增加的幅度随着分流比增加愈来愈缓慢, 并且在分流比为 0.9 时达到极大值 7%。

参考文献:

- [1] 焦树建. 欧洲的 IGCC 示范工程与研发工作[J]. 燃气轮机技术, 2006, 19(2): 1-10.
- [2] 唐宏青. 碳一化工新技术[M]. 成都:《氮肥与甲醇》编辑部, 2006.
- [3] 宋维端, 肖任坚, 房鼎业. 甲醇工学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1991.
- [4] NETL. Shell gasifier IGCC base cases[R]. PED-IGCC-98-001, 1998.
- [5] 汪寿建. 天然气综合利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [6] 谭天恩, 麦本熙, 丁惠华. 化工原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 1998.

(编辑 韩 锋)

甲醇/电联产系统中甲醇合成与精馏模拟及变负荷研究 = **A Study of Methanol Synthesis, Distillation Simulation and Load Variation of a Methanol/Power Cogeneration System** [刊, 汉] / WANG Ming-hua, LI Zheng, FENG Jing, et al (Thermal Energy Engineering Department, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 363 ~ 368

As one of the most promising clean-coal-fired power generation technologies, an integrated gasification combined cycle (IGCC) system coupled with a methanol synthesis system not only can enhance the load regulating ability of the system but also simultaneously improve the cost-effectiveness of the IGCC power plants. The flow path in the process of C301 type LP tube row gas-phase methanol synthesis and three-tower distillation was simulated through the use of software ASPEN, and a tactic for load-variation regulation based on the divided flow ratio and circulation ratio has been proposed. With the help of a four-quadrant chart, the methanol load variation range and the ability of regulating power loads under the condition of different divided flow ratios and circulating ratios were shown. In addition, a load variation regulation of distillation processes was accomplished through a change of the reboiling and condensing loads of various distillation towers. **Key words:** methanol/power cogeneration, IGCC (integrated gasification combined cycle), methanol synthesis, methanol distillation, load variation

悬臂转子远端优化主动平衡技术研究 = **A Study of the Active Balancing Technology for the Far End Optimization of a Cantilever Rotor** [刊, 汉] / SU Yi-nu, HE Li-dong, FENG Wei (Diagnosis and Self-healing Engineering Research Center, Beijing University of Chemical Technology, Beijing, China, Post Code: 100029) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 369 ~ 372

To guide the application of an active balancing device in industrial cantilever rotors, a cantilever rotor test stand was set up to perform an experimental study of active balancing technology. The results of finite-element simulation calculation of a test stand rotor show that the balancing device installed on a coupling can effectively reduce the vibration caused by any imbalance of a flying wheel. At two rotating speeds, both amplitudes of 2 # bearing can be reduced by over 25%. However, during the vibration reduction of 2 # bearing, the vibration of 1 # bearing will increase rapidly. An optimized control over 1 # and 2 # bearing vibration was proposed to make the vibration of both bearings at the operating speed not exceed alarm value 50 μ m. Based on the idea of an optimized control, hydraulic automatic balancing experiments at several rotating speeds were performed on the cantilever rotor test stand. The test results verified the conclusion of the simulation calculation, and the amplitude reduction of 2 # bearing amounts to over 30%, achieving a relatively good balancing effectiveness. The numerical simulation and experimental study have laid a foundation for the application of active balancing technology to cantilever rotors in engineering practice. **Key words:** cantilever rotor, active balance, vibration, optimized control

长外伸段转子高速动平衡时支承方式的研究 = **A Study of the Supporting Modes for a Long Overhanging Rotor During a High-speed Dynamic Balancing Process** [刊, 汉] / QI Nai-bin, YUAN Qi, RAO Jin-yang (College of Energy Source and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2008, 23(4). — 373 ~ 377

For large capacity steam turbines, the overhanging section of a LP rotor must be lengthened due to the restrictions of an exhaust hood structure. This may bring about a great difficulty for the shop high-speed dynamic balance of the rotor owing to the influence of the rotational inertia of the long overhanging section. To study the supporting modes for the rotor in question during the high-speed dynamic balance, set up was a test rig for a model rotor with a long overhanging section. Tests were performed respectively with the bearing points being moved outward and an auxiliary bearing being added. The test results show that for rotors with a long overhanging section, the method of adding an auxiliary bearing can effectively reduce the first order resonant amplitude of rotors at the main bearing points. Furthermore, there exists an optimum choice for the auxiliary bearing position. **Key words:** long overhanging section, rotor, high speed dynamic balance, supporting mode

管程转子组合式强化传热装置工业试验的研究 = **Commercial and Experimental Study of a Rotor-assembly Type Intensified Heat-transfer Device at the Tube Side** [刊, 汉] / YANG Wei-min, LI Feng-xiang, YAN Hua (College