

基于仿真模拟的合成氨系统动态特性分析研究

于双恩^{1*}, 陈斌², 郝沛², 王翠萍², 张朝环¹

(1. 北京低碳清洁能源研究院, 北京 102211; 2. 山东国华时代投资发展有限公司, 山东 济南 250002)

摘要: 新能源发电消纳需求日益增长, 电解水制绿氢进而制备合成氨逐渐成为一种消纳新能源电力的主要方式。但新能源形式具有随机性及波动性, 与传统合成氨要求“安稳长满优”特性存在巨大差异, 接入新能源易引起合成氨系统负荷不规则波动。基于 Aspen 软件搭建了合成氨仿真模型, 分析了系统温度、压力对出塔气温度、出塔气氨含量、循环比、系统能耗等参数的影响, 以及动态变负荷调节过程中氢氮比、温度、压力、空速、主要能耗、循环比、塔出口氨含量的响应特性。结果表明, 系统能耗与系统压力即氨转化率紧密相关; 新鲜气氢氮比保持定值时, 入塔气氢氮比会缓慢变化; 负荷波动时, 温度及流量控制易出现紊乱。针对低负荷不易控制情况提出改进建议。

关键词: 绿氨; Aspen 软件; 不规则波动; 低负荷控制; 氢氮比; 仿真模拟

中图分类号: TQ113.26

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)S1-0338-07

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.S1.061

Research on dynamic characteristics of synthetic ammonia system based on simulation

YU Shuang-en^{1*}, CHEN Bin², HAO Pei², WANG Cui-ping², ZHANG Zhao-huan¹

(1. National Institute of Clean-and-Low-Carbon Energy, CHN Energy, Beijing 102211, China;

2. Shandong Guohua Shidai Investment Development Co., Ltd., Jinan 250002, China)

Abstract: The demand for new energy generation and consumption is increasing day by day. Electrolysis of water to produce green hydrogen and further to synthesize ammonia has gradually become the main way to consume new energy electricity. However, new energy electricity features with randomness and volatility, which is significantly different from the requirement of traditional ammonia synthesis that requires “safety, stable, long period, full load, and excellent benefit” characteristics. Connecting to new energy power can easily cause irregular fluctuation in the load of ammonia synthesis system. A simulation model for ammonia synthesis is established based on Aspen software. The influence of system temperature and pressure on the temperature of outlet gas, ammonia content in outlet gas, circulation ratio, system energy consumption and other parameters are analyzed. The response characteristics of hydrogen/nitrogen ratio, temperature, pressure, velocity, main energy consumption, circulation ratio, and ammonia content at the outlet of tower during dynamic load regulation are analyzed. Results indicate that system energy consumption is closely related to system pressure, i. e. ammonia conversion rate; The hydrogen to nitrogen ratio of the incoming gas will change slowly when the hydrogen to nitrogen ratio of fresh gas remains constant; Temperature and flow control are prone to disturbances when the load fluctuates. Some improvement suggestions are suggested for the situations where low loads are difficult to control.

Key words: green ammonia; Aspen software; irregular fluctuation; low load control; hydrogen nitrogen ratio; simulation

随着全球碳排放压力增加, 我国在“双碳”目标要求下, 二氧化碳减排势在必行。氢能具有绿色、高效、无碳排放和应用范围广等优势, 若要实现氢能产业的大规模应用, 其面临的挑战主要是低成本、高效能的燃料电池技术和安全、高效的氢气储运技术, 其中氢气储运难的问题成为当前制约氢能产业大规模发展的主要“瓶颈”^[1]。氨为突破氢能产业瓶颈提供了可行的解决途径, 氨(NH₃)是最基本的化学物质之一, 是很多产品的重要基础前驱体, 比如肥料、化纤、染料、炸药、树脂等^[2], 氨作为一种工艺成熟、成本低廉的非碳基储氢材料, 在-33℃/0.1 MPa 的条件下就能以液态形式进行储存与运输, 可以有效

突破氢能的发展瓶颈, 具有极大的研究价值^[3-4]。因此, 发展以氨为储氢介质有望解决传统高压储运氢的难题。探索和发展可再生能源光解/电解水制氢耦合合成氨技术, 可实现可再生能源电力的“消纳和调峰”, 实现低成本、跨地域长距离存储和运输, 并与丰富的氨下游产业相结合。发展氨为储氢介质, 可贯通可再生能源、氢能和传统产业, 开发出一条符合我国能源结构特点的“清洁高效氨合成-安全低成本储运氨-无碳高效氨氢利用”的全产业链经济路线。然而, 传统的 Haber-Bosch 法合成氨是一个连续稳定运行的过程, 通常需要高温(350~500℃)和高压(15~20 MPa)条件^[5], 与波动性的可

收稿日期: 2024-01-29; 修回日期: 2024-05-07

作者简介: 于双恩(1990-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为氢能、燃料电池, 通讯联系人, 20029603@ceic.com。

再生能源制氢耦合面临诸多挑战,波动性的可再生能源与传统合成氨行业要求的“安稳长满优”^[6](安全、稳定、长周期、满负荷、效益优)特性存在巨大差异,新能源制氢与传统合成氨耦合、实现柔性合成氨过程有待进一步研究。邱一苇研究团队指出,由于合成塔热惯性较大,对于分钟级电力波动导致的原料输入不平稳,需设置原料气和产物储罐缓冲;对于小时级以上波动,则能在保证安全的前提下调节负载,但需提升自动化控制水平予以实现^[7]。可以预期,随着清洁可再生电力装机容量逐步增长,绿氨合成产业将逐渐取代传统煤基合成氨产业,在完成行业绿色转型的同时,也会为能源市场带来更多可能性^[8-9]。有研究指出合成氨工段的快速爬坡能力是发挥电制氢合成氨负荷柔性调节能力的关键,研发具有快速爬坡能力的柔性电制氢合成氨工艺,将有助于提升新能源发电制氢进而合成氨系统的风电消纳能力和收益水平^[10]。目前已有的工业级合成氨装置,对不同工况进行操作涉及成本及安全问题且耗时较长^[11],因此可采用模拟手段对多种情况进行分析。化工流程模拟在化工过程中起到十分重要的作用,成为工艺优化研究及工厂实际生产流程模拟的重要手段^[12]。本文主要采用 Aspen 仿真模拟手段,研究波动工况下合成氨系统各关键参数可能发生的变化,以及对可能出现的安全问题提出应对策略及建议。

1 工艺流程模拟及分析方法

流程模拟是以工艺过程的机理为基础,采用数学模型表示工艺过程,并通过计算机辅助进行过程的物料衡算、能量衡算、相平衡计算、设备尺寸设计和动力学模型等计算,最终作出相应的环境和技术经济评价^[13]。本文内容基于 Aspen 环境进行仿真模型搭建及分析。

1.1 合成氨稳态模型

模型根据传统哈伯法合成氨工艺进行搭建^[14-15],以煤为主要原料进行合成氨时,除新鲜原料气 N_2 、 H_2 外,还含有少量的 CH_4 、Ar 等惰性气体^[16],而新能源发电产氢中惰性气体较少。本文中模型以新能源发电经过电解水制备的氢气为氢源原料,以空分制备的氮气为氮源原料,进行传统合成氨工艺流程模拟^[17]。工艺流程中氢源、氮源首先经过缓冲罐进行混合,然后经过一段压缩机(包含两级压缩)使新鲜混合气增压至 10 MPa,控制压缩机出口气体温度在 50℃ 以下,再与系统中循环气混合均

匀,经循环压缩机增压至 14.7 MPa 左右,在合成氨塔进口端经换热器与塔内反应后气体换热,通入合成塔内,通过水蒸气取热系统进行控温,然后采用多段水蒸气取热对其进行降温,同时副产中压蒸汽。换热后气体经过冰机系统冷却至 -10℃ 进入分氨罐,其中未反应气体经循环回路与新鲜气混合,继续进行反应,另一部分液体经减压进入到储氨罐,得到氨产品,其中储氨罐所排气体可经处理后继续回用,具体工艺流程如图 1 所示,该模型为 10 万 t/a 合成氨简易工艺流程。需要说明的是,模型中合成氨塔只采用单管从上端进入、从下端排出的方式,未增设冷激气调温管线^[18],以便于对多种因素变化带来的影响进行讨论,另外其中反应动力学采用同一参数,以确保变更工况过程催化剂种类不变,具体反应动力学及参数如式(1)~式(3)所示。

$$r = k \times f(\text{基准}) - k' \times f'(\text{基准}) \quad (1)$$

$$k = A \times \exp\{-E/RT\} \times T^b \quad (2)$$

$$k' = A' \times \exp\{-E'/RT\} \times T^{b'} \quad (3)$$

式中, r 为反应速率常数; $f(\text{基准})$ 、 $f'(\text{基准})$ 分别表示正反应基准组分与逆反应基准组分,此处基准为气相组分中氮气分压; k 为正反应速率常数; k' 为逆反应速率常数; A 为正反应指前因子; A' 为逆反应指前因子; E 为正向反应活化能; E' 为逆向反应活化能; R 为摩尔气体常数; T 为开氏温度; b 为正反应扩展速率常数, b' 为逆反应扩展速率常数。

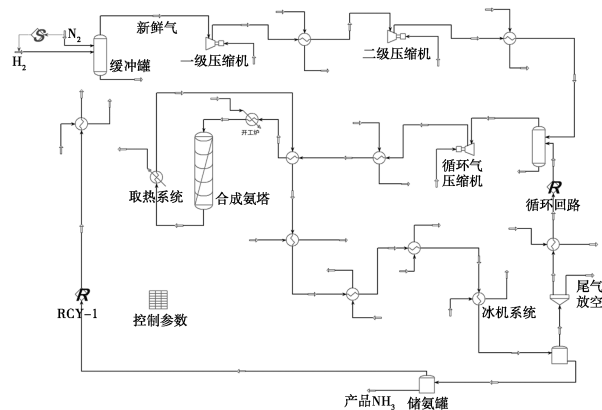


图 1 合成氨工艺流程稳态仿真模拟

1.2 合成氨动态模型

在稳态合成氨工艺流程基础上,对模型中气源流量、储罐液位、冷却系统流量、冰机系统等关键设备增加 PID(比例-积分-微分)控制,PID 控制器操作是在动态模式下操纵模型的主要手段,通过调整 OP(开度)值,以将特定 PV(变量)保持在 SP(特定值)。

动态模拟过程依据滞留模型中累积、非平衡闪蒸、热损失、化学反应模型以及压力流量求解模型等理论基础,遵循物料平衡、能量平衡、组分平衡等规律,具体过程如式(4)~式(8)所示。可帮助分析系统动态响应特性、研究控制策略,为工艺及控制策略改进提供参考数据。

$$m_a = m_{in} + m_R - m_{out} \quad (4)$$

$$R_{c,j} = f_{in,j} - f_{out,j} + R_j \quad (5)$$

$$R_E = f_{in,E} - f_{out,E} + H_b + H_R - W_s \quad (6)$$

$$Q = UA(T_f - T_{amb}) \quad (7)$$

$$V = \text{常数} = f(w, h, p, T), \quad dv/dt = 0 \quad (8)$$

式中, m_a 为物料累积量, m_{in} 为进口物流流量, m_R 为循环物流流量, m_{out} 为出口物流流量; $R_{c,j}$ 为组分 j 的积累速率, $f_{in,j}$ 为组分 j 流入系统的流量, $f_{out,j}$ 为组分 j 流出系统的流量; R_j 为组分 j 通过反应形成的速率; R_E 为总能量积累率, $f_{in,E}$ 为总能量流入系统的流量, $f_{out,E}$ 为总能量流出系统的流量, H_b 为通过系统边界添加到系统的热量, H_R 为反应产生的热量; W_s 为系统对周围环境所做的功; Q 为热损失; U 为总传热系数; A 为传热面积; T_f 为流体温度; T_{amb} 为环境温度; V 为容器的体积, t 为时间, w 为质量流量, h 为滞留量, p 为容器的压力, T 为容器的温度。

模型修改完成后,首先启动模型,保持额定负荷运行一段时间,待模型中物料组分、压力、温度稳定后开始进行系统整体负荷调节,观察工艺流程中关键参数的变化,并对不同工况结果进行分析讨论。

1.3 分析方法

在稳态下进行案例研究分析,采用单因素分析方法,分别单独设定入塔气的温度、压力及氢氮比在一定范围内变化,考察对系统中出塔气中氨含量、出塔气温度、循环比、主要设备总能耗的影响,根据结果进行分析。模型调试时对系统中各参数进行验证,可稳定运行且各参数符合实际则认为模型可信,然后根据需要,变换系统中各参数及运行负荷,考察关键参数响应特性以及在极端工况下在虚拟环境中显示可能会出现的后果,并对结果进行分析。

2 结果与讨论

2.1 模拟过程关键参数

稳态条件下额定工况模拟过程中关键参数如表 1 所示,总氢气进气量为 1 145 kmol/h,新鲜气进气量为 1 526 kmol/h,系统中循环比为 2.5、空速为 6 246 h⁻¹,新鲜气氢氮比为 3.0,入塔氢氮比为 2.995,每小时产氨量为 12.93 t,年产氨量约为

10 万 t (每年按 8 000 h 计算)。

表 1 模拟过程关键参数

参数	数值	参数	数值
循环比	2.5	年产 NH ₃ 量/万 t	10
空速/h ⁻¹	6246	入塔氢氮比	2.995
合成塔高径比	6.25	尾气放空量/(Sm ³ ·h ⁻¹)	28.36
氢源进气量/(Sm ³ ·h ⁻¹)	28010	压缩机能耗/kW	5316
NH ₃ 产量/(kg·h ⁻¹)	12930	合成氨塔容积/m ³	20.1
新鲜气氢氮比	3	入塔压力/kPa	14670
循环气氢氮比	2.993	出塔温度/°C	479.7
入塔气氨含量/%	2.613	出塔压力/kPa	14620
出塔气氨含量/%	19.43	冰机系统能耗/kW	5510
入塔温度/°C	230	产品 NH ₃ 纯度/%	99.64

2.2 稳态模拟及分析

基于 Aspen 模型在稳态环境下,分别采用单因素变量法探讨入塔温度、压力对出塔气氨含量、出塔气温度、循环比、系统内主要能耗(压缩机、冰机系统能耗)的变化规律。

2.2.1 塔入口温度变化影响

在图 1 合成氨工艺流程稳态仿真模拟的基础上,进行温度案例研究分析。以入塔气温度为自变量,设定起始温度为 150°C,结束温度为 300°C,按照 0.5°C 步长增长,分析出塔气中氨含量、出塔气温度、系统循环比、系统主要能耗等参数的变化,结果如图 2~图 5 所示。

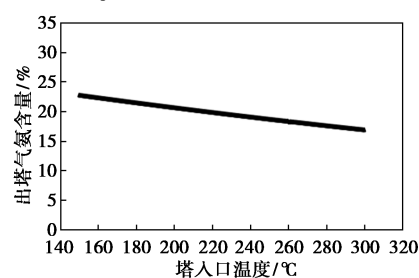


图 2 出塔气氨含量与塔入口温度关系

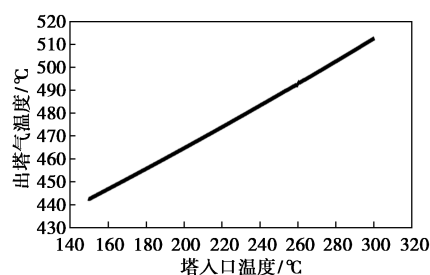


图 3 出塔气温度与塔入口温度关系

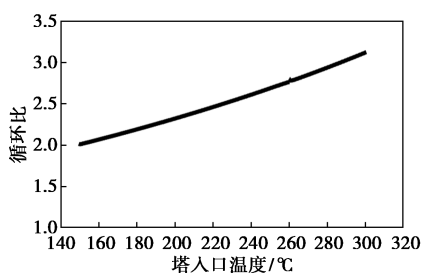


图4 循环比与塔入口温度关系

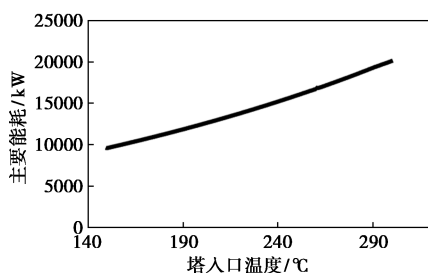


图5 系统主要能耗与塔入口温度关系

从图2中可以看出,随塔入口温度增加出塔气氨含量逐渐降低,塔入口温度为150℃时,出塔气中氨组分约占22.7%,塔入口温度为300℃时,出塔气中氨组分约占16.8%,因合成氨反应是可逆放热反应,低温条件有利于反应向生成氨方向进行,温度升高利于向氨分解方向进行。从图3中可看出,随着塔入口温度升高出塔气温度随之逐渐升高,因进入合成氨塔内热量增加,虽然温度升高有利于反应向氨分解的放热方向进行,但平衡向左移动减少的放热量不足以抵消系统内新增加的热量,所以出塔气温度仍会升高。

从图4、图5可以看出,系统内循环比及主要能耗随进口温度变化均有升高趋势,首先循环比增加主要是因为温度升高合成氨反应向氨分解方向进行,系统未反应的氢气与氮气量增加,进而使循环气量增加,引起循环比增加。同理分析系统主要能耗,也是因为循环气量增加导致系统内循环压缩机及冰机系统处理气量增加,所以系统内主要能耗随之增加。

2.2.2 塔入口压力变化影响

在图1合成氨工艺流程稳态仿真模拟的基础上,进行压力案例研究分析。以入塔气压力为自变量,设定起始压力为10 000 kPa,结束压力为20 000 kPa,按照100 kPa步长增长,分析出塔气中氨含量、出塔气温度、系统循环比、系统主要能耗等参数的变化,结果如图6~图9所示。

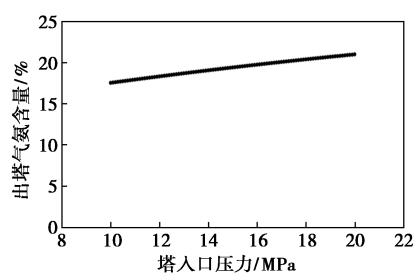


图6 出塔气氨含量与塔入口压力关系

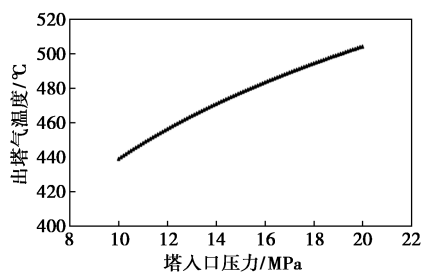


图7 出塔气温度与塔入口压力关系

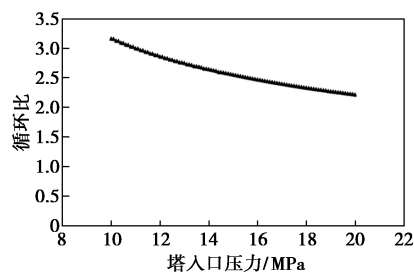


图8 系统循环比与塔入口压力关系

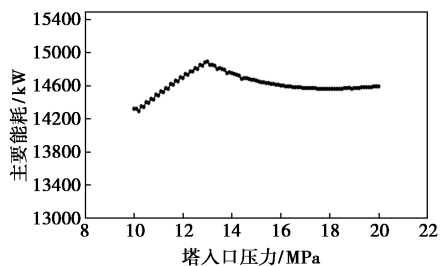


图9 系统主要能耗与塔入口压力关系

从图6、图7中可以看出,出塔气氨含量及温度随塔入口压力增加而增加,塔入口压力由10 MPa增加至20 MPa过程中,出塔气氨含量由17.5%增加至21.0%,出塔气温度由439℃增加至504℃。

图8中显示系统循环比随塔入口压力增加而降低,从开始的3.16降低至2.22。

图9中系统的主要能耗随塔入口压力先增加后减小。

统一分析上述现象,主要是因为塔内反应压力增加反应向着合成氨反应方向进行,氨转化率增加,

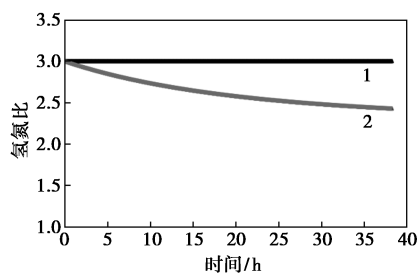
释放更多热量,所以出塔气氮含量与出塔气温度会增加。另外因反应向合成氨方向进行,参与反应的氢气与氮气会减少,所以系统循环比会下降,而系统内主要能耗随塔入口压力先增加是因为压缩机要对气体做功使压力升高,然后在大概 13 MPa 处出现拐点开始随塔入口压力增加而降低,是因为系统内循环量在同步降低,循环压缩机及冰机系统需要处理的气量有所降低,大于为增压需要压缩机做的功,总的主要能耗开始下降最后趋于平稳,所以会出现系统主要能耗先增加后降低的结果。

2.3 动态模拟及分析

在图 1 稳态模型基础上,通过对关键设备的流量、液位增加 PID 控制转变为可调试模型,为便于分析,相比稳态模型在工艺流程中做了部分简化处理,具体以下述调试数据为准。启动模型调试功能进行合成氨反应及物料流动,验证该工艺可行性,观察入塔气氢氮比变化,并调节进料量,分析系统压力、温度、能耗、出塔气氮含量、氨产品、循环比等参数变化。

2.3.1 氢氮比变化

调试过程氢氮比随时间变化情况如图 10 所示。启动模型调试模式,设定新鲜气氢氮比为 3.0,保持系统内各项输入参数不变。



1—新鲜气氢氮比;2—入塔气氢氮比

图 10 调试过程氢氮比随时间变化

从图 10 中可看出,随着时间的推移入塔气氢氮比在逐渐降低,从开始时氢氮比为 3.0 开始计时,大约 38 h 后入塔气氢氮比降低至 2.4 并逐渐趋于稳定。分析原因是由于出塔气经降温深冷分离后,有少量氢气、氮气溶于液氨中进入下一步工艺,离开合成氨系统。

入塔气氢氮比=3 时关键物料参数见表 2,入塔气氢氮比=2.4 时关键物料参数见表 3。

由表 2、表 3 关键物料参数可知,开始入塔氢氮比为 3 时,溶于液氨中氢氮比为 0.75/0.16=4.69,最后入塔氢氮比为 2.4 时,溶于液氨中氢氮比为

表 2 关键物料参数(入塔气氢氮比=3)

组分	新鲜气组成/%	循环气组成/%	分氨罐液氨组成/%
H ₂	75.06	72.31	0.75
N ₂	24.94	23.93	0.16
Ar	0.0025	0.026	0.0049
NH ₃	0	3.74	99.09

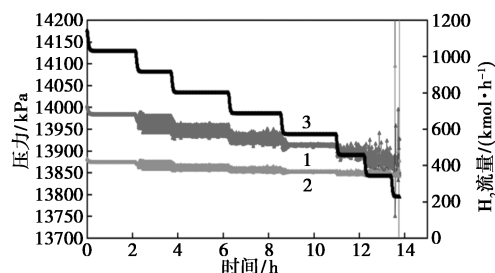
表 3 关键物料参数(入塔气氢氮比=2.4)

组分	新鲜气组成/%	循环气组成/%	分氨罐液氨组成/%
H ₂	75.06	66.00	0.69
N ₂	24.94	27.50	0.20
Ar	0.0025	0.026	0.0049
NH ₃	0	3.81	99.00

0.69/0.20=3.45,均大于氢气与氮气完全反应比例为 3 的值,即有多于 3:1 比例的氢气溶于液氨中离开系统,导致循环气中氢氮比逐渐降低,所以会出现新鲜气氢氮比保持不变时入塔气氢氮比逐渐降低,结合实际合成氨生产过程,应实时监测合成塔入塔气氢氮比,使其保持在 2.8~3.1 的合理范围内,出现偏差及时调整,以免出现反应速度降低、合成塔温度下降、压力上升甚至最终反应停止的极端情况。有研究指出,氢氮比失调是一个长期累积的过程,实际情况下氢氮比长期低于 2.6 或者长期高于 3.4 约 4 h 左右,合成反应变差,若在此过程中不进行及时纠偏,合成塔随即进入垮塌阶段^[19]。

2.3.2 系统压力、温度变化

开始调试模式,系统压力随负荷降低的变化情况见图 11,系统温度随负荷降低的变化情况见图 12。



1—塔入口压力;2—塔出口压力;3—进 H₂ 流量

图 11 系统压力随负荷降低的变化

从图 11 可知,始终保持入塔气氢氮比在 3.0 左右,系统压力、温度随系统负荷(等效于氢气进流量)降低时(从 100% 额定负荷每次降低 10%,待系

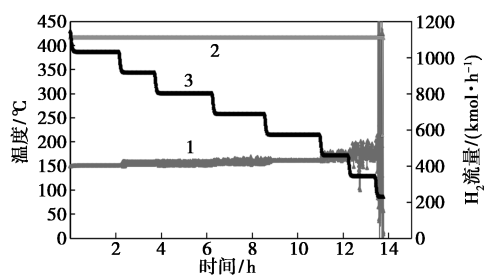
1—塔入口温度;2—塔出口温度;3—进 H₂ 流量

图 12 系统温度随负荷降低的变化

统稳定后再降低 10%, 调试过程最低降至 20% 负荷)塔入口压力及塔出口压力均有所降低。在负荷降至 80% 时塔入口压力开始出现较大波动, 塔出口压力也出现较小波动, 但两者仍旧可在一定范围内保持平稳运行; 当负荷降至 40% 时, 塔入口压力出现大幅波动, 降至 20% 负荷时塔出入口压力均出现大幅波动, 随即系统出现崩溃无法继续运行。图 12 中温度变化显示, 随负荷降低, 塔入口温度出现增加, 塔出口温度出现小幅降低, 在降至 40% 负荷时, 塔入口温度出现较大波动, 继续降负荷波动增加直至系统崩溃无法运行。

2.3.3 其他参数变化

图 13、图 14 为同一模型调试过程中空速及系统主要能耗随负荷降低时的变化情况, 循环比随负荷降低的变化见图 15, 塔出口氨含量随负荷降低的变化见图 16。

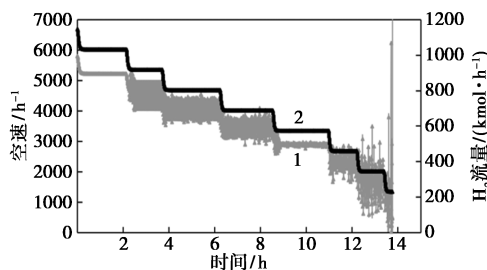
1—空速;2—进 H₂ 流量

图 13 空速随负荷降低的变化

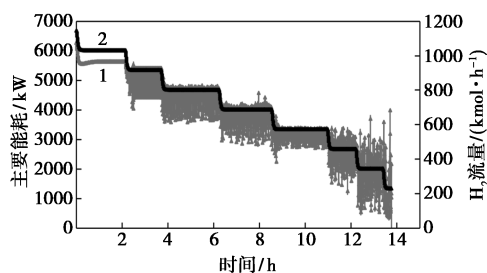
1—系统主要能耗;2—进 H₂ 流量

图 14 能耗随负荷降低的变化

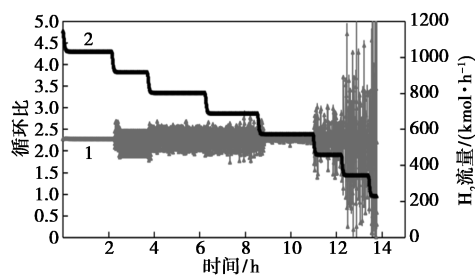
1—循环比;2—进 H₂ 流量

图 15 循环比随负荷降低的变化

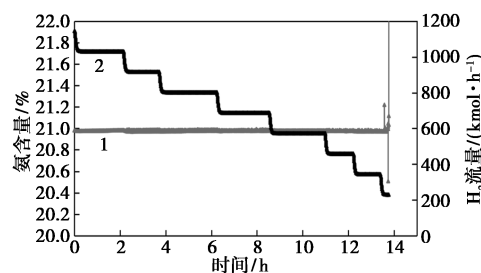
1—塔出口氨含量;2—进 H₂ 流量

图 16 塔出口氨含量随负荷降低的变化

由图 13、图 14 可知, 同样出现在降至 90% 负荷以下时便开始出现波动, 空速波动大同时氢气进气量控制平稳, 说明循环气量出现波动情况。图 15 中循环比变化也可说明是此种情况, 进而会引起压缩机及冰机系统能耗出现波动, 反映到系统主要能耗会出现波动。从图 16 中可知, 塔出口氨含量约为 20.98%, 波动较小。

2.3.4 氨产品参数随负荷降低的变化

氨产品参数随负荷降低的变化见图 17, 从图 17 中可以看出, 最终产品氨流量随负荷降低而相应降低, 降低幅度基本与负荷降低程度一致, 其中氨组分含量均在 99.6% 左右, 波动误差小于 0.01%, 主要是因为产品氨的纯度只与产氨的温度及压力有关, 温度、压力一定时, N₂、H₂、NH₃、Ar 饱和蒸气压即为定值, 所以产氨的温度、压力一定时, 则产品氨纯度也为定值。

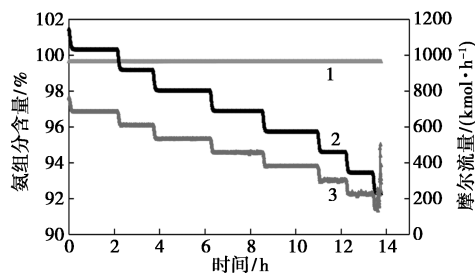
1—产品氨组分含量;2—进 H₂ 流量;3—产品氨流量

图 17 氨产品参数随负荷降低的变化

2.3.5 波动原因分析

重新运行仿真模型,检查系统中各部分参数,寻找降负荷时系统易出现波动的原因。发现最主要原因是模型中降温用的循环冷却水量及冰机系统冷氨流量换热器处不易准确平稳控制^[20],导致系统中循环气温度处于波动状态,影响到了循环过程一系列的过程。结合实际分析,首先采用的 PID 控制系统需要在多个负荷工况下均能准确平稳控制流量、温度、压力、液位等^[21],可采用多通量管道及阀门配合,调节过程需控制速率,缓进行,以满足多负荷工况尤其是低负荷工况要求。对于冰机制冷系统,可采用两段或者更多段逐级进行降温^[22],来更好地控制循环回路气体流量,以确保系统安全稳定运行。

3 结论

本文以新能源发电制氢为氢源,结合实际情况,在氢源流量处于波动情况下,基于 Aspen 模拟环境搭建了绿氨合成的稳态仿真模型,分别探讨了温度、压力对出塔气温度、出塔气氨组分、循环比、主要能耗的影响,随后基于该稳态模型,进一步在动态模拟环境下对该工艺进行了长时间、多负荷工况的运行测试验证,分析讨论了在氢源流量波动的情况下合成氨系统的响应特性,针对易出现的问题给出建议。

(1) 温度升高不利于合成氨反应,压力升高有利于合成氨反应,系统能耗与系统压力即氨转化率紧密相关,能耗随反应压力升高先增加后降低。主要是因为压缩机能耗与经过气体流量有关,随压力增加塔内反应向氨生成方向进行,氨转化率增加,循环气量减少,经过压缩机总气量减少,所以进口压力增加至一定程度时总能耗会出现下降情况。

(2) 固定新鲜气氢氮比时,随时间进行入塔气氢氮比会逐渐降低。原因是在降温分离液氨过程中,溶液液氨中的气体氢氮比高于正常反应的 3:1,所以循环气中氢氮比会小于新鲜气氢氮比,实际工业应用中也需要实时监测入塔气氢氮比在合适范围,否则会引起系统内压力升高、温度降低,甚至出现垮温。

(3) 进行多负荷工况连续运行测试时,降低新鲜气总进气量系统易出现波动甚至崩溃。主要是因为系统中循环气体的流量及温度难以控制,如工艺中降温用循环冷却水流量及冰机系统冷氨流量不易准确平稳控制、偏离额定负荷时流量控制阀门参数不合适等因素,导致系统中循环气流量、温度处于波动状态,进而影响全工艺过程。

(4) 针对合成氨变动负荷过程温度难以控制问题,应控制负荷调节速率,及时配套合适 PID 参数;针对流量难以控制问题,可同时采用多通量管路协同控制,通过多通量管路集群控制来平稳适应全负荷运行工况。

参考文献

- [1] 曾悦,王月,张学瑞,等.可再生能源合成绿氨研究进展及氢-氨储运经济性分析[J].化工进展,2023,43(1):376-389.
- [2] 李莎莎,李雯.常温常压下氮气还原合成氨催化剂的研究进展[J].现代化工,2019,39(10):46-50.
- [3] 赵晓东,文婕,于明伟,等.氨能源技术的开发及前景展望[J].现代化工,2023,43(4):50-53,59.
- [4] 张真,张凡,云祉婷.绿氨在石化和化工行业的减碳经济性分析[J].化工进展,2024,43(6):3021-3028.
- [5] Foster S L, Bakovic S I P, Duda R D, et al. Catalysts for nitrogen reduction to ammonia[J]. Nature Catalysis, 2018, 1(7):490-500.
- [6] 袁强强.合成氨装置原料气压缩机段间水冷器阻力高原原因分析及解决[J].中氮肥,2023,(5):27-29,40.
- [7] 邱一苇,吉旭,朱文聪,等.面向新能源规模化消纳的绿氨化工技术研究现状与关键支撑技术展望[J].中国电机工程学报,2023,43(18):6934-6954.
- [8] 丁宁,陈千惠,刘丹禾,等.制储氢技术经济性分析与前景展望[J].洁净煤技术,2023,29(10):126-144.
- [9] Salmon N, Bañares-Alcántara R. Green ammonia as a spatial energy vector: A review[J]. Sustainable Energy & Fuels, 2021, 11(5):2814-2839.
- [10] 杨国山,朱杰,宋汶秦,等.基于伊藤过程的电制氢合成氨负荷随机最优控制[J].中国电力,2023,56(7):66-77.
- [11] 张林.合成氨装置高压废热锅炉常见故障及处理[J].设备管理与维修,2023,(17):62-63.
- [12] 邵青楠,顾鑫诚,邓春.天然气处理工艺建模与模拟进展[J].石油科学通报,2019,2(4):192-203.
- [13] 田文爽,李欣,白鹏翔.流程模拟技术在合成氨工业 CO₂ 排放核算中的应用[J].石油石化绿色低碳,2020,5(6):69-74.
- [14] 刘化章.合成氨工业:过去、现在和未来——合成氨工业创立 100 周年回顾、启迪和挑战[J].化工进展,2013,32(9):1995-2005.
- [15] Gbemisola O, Kyle C. Sustainable ammonia production via electrolysis and haber-bosch process[J]. Computer Aided Chemical Engineering, 2022, 51:229-234.
- [16] 鲁玉莹,李庆勋,刘晓彤,等.合成氨回路中降低惰性气体含量的措施[J].现代化工,2016,36(8):166-169.
- [17] 安东亮,董颖,吴丹.新型生产工艺生产合成氨系统安全生产问题研究[J].天津化工,2023,37(4):63-66.
- [18] 徐小军.DC-C 型氨合成塔在合成氨装置上的应用[J].大氮肥,2023,46(3):145-148.
- [19] 祝志.卡萨利合成氨应用研究[J].化肥设计,2022,60(3):25-28.
- [20] 周鹏.两种不同类型换热器的组合在合成氨工艺中的应用[J].氮肥与合成气,2023,51(6):52-54.
- [21] 刘恩.基于 DCS 自动化控制系统的合成氨工艺研究[J].仪器仪表用户,2023,30(8):18-21.
- [22] 周瑞.合成氨装置氨冰机出口压力高原原因分析及优化改造[J].中氮肥,2023,(5):16-19. ■