

# 变压吸附氢回收率低的原因分析及解决方法

张钢强,葛庆\*,孙朋涛,刘书缘  
(新疆宣力环保能源股份有限公司,新疆哈密963000)

**摘要:**以50万t/a煤焦油加氢配套的荒煤气制氢( $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ )项目为研究目标,对变压吸附的原理进行了简要探讨,同时初步分析了造成荒煤气制氢中变压吸附氢回收率低的原因,并结合实际给出了一定的解决措施,使得变压吸附制氢装置能够高效、稳定、经济运行,同时变压吸附氢气回收率由原始运行的90.0%~92.3%提高到95%左右。

**关键词:**变压吸附;荒煤气;氢气;回收率

**中图分类号:**TQ028.2

**文献标志码:**A

**文章编号:**0253-4320(2022)07-0241-05

**DOI:**10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2022.07.046

## Causes for low recovery of hydrogen in PSA process and solutions

ZHANG Gang-qiang, GE Qing\*, SUN Peng-tao, LIU Shu-yuan  
(Xinjiang Shinning Environmental Energy Co., Ltd., Hami 963000, China)

**Abstract:**The 100 thousand cubic meter per hour hydrogen production project with raw coke oven gas as feedstock, which is supported by a certain 500 000 tons per year coal tar hydrogenation plant, is taken as study object. The principle of pressure swing adsorption (PSA) is discussed, and the causes for low recovery rate of hydrogen in hydrogen production from raw coke oven gas via PSA are preliminarily analyzed. Certain corresponding solutions are given, ensuring the PSA unit to run efficiently, stably and economically, and improving the recovery rate of hydrogen from 90% - 92.3% to around 95%.

**Key words:**pressure swing adsorption; raw coke oven gas; hydrogen; recovery rate

当今社会,面对日益匮乏的能源和严重的环境问题,如何高效利用现有能源、开发新能源备受广大研究者关注<sup>[1]</sup>。氢气作为理想中的洁净无污染绿色能源,是实现我国“2030年碳达峰,2060年碳中和”的有效途径<sup>[2]</sup>。氢气无法直接从自然界获取,常规制取氢气的方法可以分为水蒸汽重整<sup>[3-4]</sup>、天然气<sup>[5-6]</sup>、电解水<sup>[7-8]</sup>、石油裂解<sup>[9]</sup>、煤气化<sup>[10-11]</sup>等,考虑到能源的高效利用、环境的友好、生产成本的节约,从含氢混合气体(尾气)中提取纯氢气得到应用。

现阶段对于氢气纯化主要依靠3种技术<sup>[12-13]</sup>:①低温精馏;②膜分离;③变压吸附。低温精馏是依据组分的沸点不同对物质进行分离,由于气体的沸点相对较低,该方法能耗较高。膜分离依据不同物质穿透膜的能力而对物质进行分离,虽然在工业化氢气分离得到一定的应用,但是具有一定的局限性导致应用受到限制。变压吸附是在恒温条件下,依据吸附剂对不同气体的吸附能力不同,且不同压力下吸附能力也不同特性,对气体进行分离、提纯的一

种技术。

荒煤气是煤炭在焦化时产生的一种可燃性气体,是煤焦化时的一种副产品。经报道,2017年副产荒煤气超 $1.0 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ,其中约20%处于放散状态<sup>[14]</sup>。随着人类对氢能源的需求量越来越大,如何高效、合理地利用荒煤气制得高纯度氢气越来越受到人们关注。本文中以50万t/a煤焦油加氢配套的荒煤气制氢( $1.0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{h}$ )项目为基础,通过相关文献调阅,初步分析造成荒煤气制氢中变压吸附氢回收率低的原因,结合实际运行,给出了相应的解决措施,确保了变压吸附制氢装置的高效、稳定、经济运行,为以后研究变压吸附给予一定的参考。

## 1 变压吸附工艺原理

变压吸附(pressure swing adsorption, PSA)最早由Skarstrom于20世纪中期提出<sup>[15]</sup>,是建立在吸附剂研究的基础上。工艺由于能耗低、运行成本低、自动化程度高等优点<sup>[16]</sup>,已被广泛应用于制氧、制氮、

收稿日期:2021-08-16;修回日期:2022-04-29

基金项目:新疆维吾尔自治区重大科技专项(202113431)

作者简介:张钢强(1988-),男,硕士,工程师,研究方向为煤化工,845886230@qq.com;葛庆(1977-),男,本科,高级工程师,研究方向为煤化工,通讯联系人,1493644@qq.com。

制氢、气体净化等领域<sup>[17]</sup>。变压吸附以等温吸附为前提<sup>[18]</sup>，在相同压力下，依靠吸附剂对不同气体分子的吸附能力、扩散速率以及位阻效应的不同对气体进行分离。且吸附剂在不同压力下对同种物质的吸附能力有所不同，通过压力改变可以实现对气体的吸附与解吸，从而实现对特定物质的分离、浓缩以及纯化。

## 2 荒煤气制氢工艺流程

装置利用来自外界的 150 000 m<sup>3</sup>/h (干基) 荒

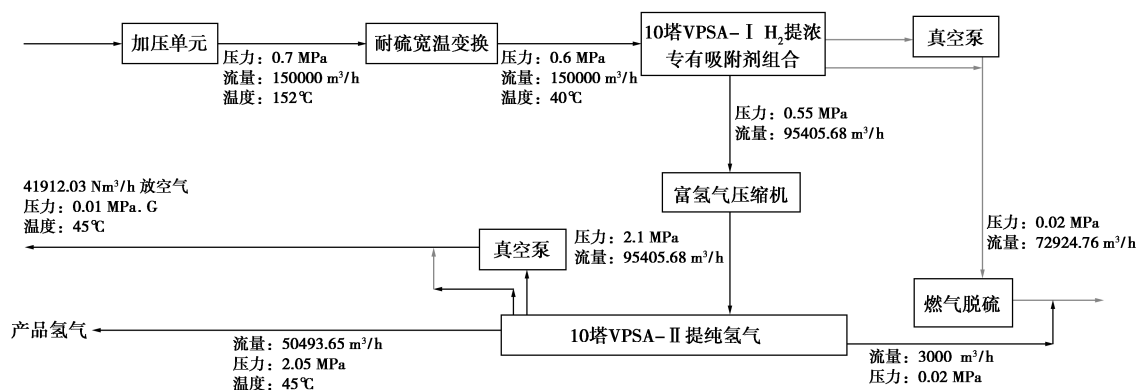


图 1 工艺方框图

该装置设计中提浓和提纯都采用多塔变压吸附工艺，提浓段的变压吸附是由吸附、3 次均压降压、逆放、抽真空、3 次均压升压和产品最终升压 6 大步骤组成的 10-4-3 流程。PSA 提浓段主要是把变换气中约为 32% 氢气提升得到 55% 以上的富氢气，而被吸附剂吸附的气体通过逆放和真空步骤解析出来，进入燃料气系统。气体组分见表 1。提纯段的变压吸附工艺过程由吸附、5 次均压降压、顺放、逆放、真空、5 次均压升压和产品最终升压 7 大步骤组成的 10-1-4 流程。

表 1 气体组分 (体积分数) %

名称	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	C <sub>m</sub> H <sub>n</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>
变换气	31.32	0.61	5.79	1.01	23.38	37.89	0.00
富氢气	56.59	0.00	0.10	0.00	0.00	43.31	0.00
燃料气	0.3720	1.3850	13.3775	2.7617	52.9162	29.1876	0.00

## 3 荒煤气制氢中氢回收率低的原因分析

根据物料守恒氢气回收率可以用公式  $y = (\varphi_1 \times \mu_1) / (\varphi_0 \times \mu_0)$  计算，其中  $y$  为回收率； $\varphi_1$  为产品氢气体积分数，%； $\mu_1$  为产品氢气的体积流量，m<sup>3</sup>/h； $\varphi_0$  为变换气中氢气的体积分数，%； $\mu_0$  为原料气的体

积流量，m<sup>3</sup>/h。装置设计氢气回收率达到 93%，但是通过实践测得该装置的氢气回收率为 90.0% ~ 92.3%。氢气回收率低于设计值，造成氢气回收率低的原因主要集中在以下几点。

### 3.1 原料气组分发生改变

PSA 提浓段的设计为氢气含量约 31.32%，一氧化碳含量约为 0.61%，硫化氢含量小于 155.9 mg/m<sup>3</sup>，见表 1 气体组分中变换气分析数据。但是实际运行数据均与设计值存在一定偏差 (见表 2 实际运行数据)，运行中氢气体积分数小于 30%，一氧化碳体积分数大于 0.67%，而硫化氢含量为设计值的 4 倍，原料气含有一定的水分和轻质油。运行与设计的偏差

表 2 实际运行数据

年月	组分 (体积分数) 均值/%						总硫均值/ 10 <sup>-6</sup>
	H <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> +Ar	N <sub>2</sub>	
2020.8	29.11	1.22	4.37	21.40	1.03	42.93	721.00
2020.10	28.86	1.63	4.16	21.13	1.03	42.72	492.61
2020.11	28.70	1.98	4.16	21.43	1.00	45.01	555.22
2021.03	28.10	1.06	4.04	22.28	0.94	43.86	482.44
2021.04	27.90	0.97	4.07	21.85	1.14	44.08	541.57
2021.05	27.93	0.86	4.65	22.59	0.93	43.04	530.70

导致提浓段处于超负荷运行,为了达到目标,系统需减少吸附时间,进而增加解吸次数,使得氢气回收率下降。

### 3.2 程控阀内漏

变压吸附是依靠不同作用的程控阀门的开、关而实现的连续运行。不同装置中程控阀门的数量不同,但是每一个阀门都处于高频率的开与关的切换,甚至高达30万次/a<sup>[17]</sup>。高频次的运行不可避免会对阀芯以及阀杆造成损伤,受损的阀门直接关系到氢气的回收率。当程控阀内漏时,高压区的气体会自动向低压区流动,在一定程度上是增加了真空泵的负荷,在相同再生时间和真空泵负荷下,处于真空状态的吸附塔真空度会有所下降,影响再生效果。同时由于阀门内漏会造成部分有效气体通过真空设备直接进入后系统,造成氢气的回收率降低。

### 3.3 真空度不够

真空度的高低严重影响吸附剂再生,吸附剂再生不彻底,吸附效果就会下降。为了维持系统高效平稳的运行,需要降低吸附时间,进而增加了单位时间的解析次数,从而导致氢气回收率下降。影响真空度的因素较多,例如程控阀门内漏、背压高、动力设备等。现阶段维持解析时系统的真空度的动力源通常选用水环真空泵。

#### 3.3.1 背压高

所谓的背压是指水环真空泵的出口连接的后系统压力。当后系统压力升高后,逆放时压力差减小,推动力降低,造成逆放后塔压上升,真空泵的进气量增加,负荷上升,在相同解析时间和负荷下,真空度下降。

#### 3.3.2 动力设备

动力设备在吸附剂再生中起到决定性作用,动力设备的运行是否正常直接决定真空度的高低。①泄露影响真空度,泄露对真空度影响主要集中在水环真空泵吸气端。水环真空泵吸气端是负压区,当吸气端出现泄露点时,气体会自动进入吸气端,导致真空度有所改变。②振动影响真空度,水环真空泵的振动会对叶轮与分布盘之间的间隙有一定的影响,长时间的振动会使得间隙增加。在叶轮转动下,工作液不断冲刷分布盘,分布盘遭到不同程度的损坏,使得真空泵效率下降,最终影响真空度。③气蚀影响真空度,气蚀会对叶轮造成一定的损坏,从而影响工作效率。

### 3.4 吸附剂粉化和混合

变压吸附是一种利用吸附剂的选择性对气体分

离的工艺。因此,吸附剂决定着变压吸附的效率。吸附剂粉化是一种物理结构遭到破坏的现象,粉化后的吸附剂孔道减少,比表面积发生了一定的改变,吸附能力下降。造成吸附剂粉化的原因大体可以分为以下几种<sup>[23-24]</sup>:①装填运输时的磨损;②流量波动促使吸附剂颗粒间的摩擦加剧;③气体出现偏流,局部流速过大;④程控阀门开启过快;⑤压载物重量不足;⑥酸性物质( $H_2S$ )含量高于设计值,破坏碱性吸附剂的晶体结构。

吸附剂混合主要是指在同一吸附塔内不同种吸附剂混合在一起的一种不正常现象。在荒煤气制氢中,需在提浓段去除 $CO$ 、 $CH_4$ 、 $CO_2$ 、 $C_mH_n$ 、 $N_2$ 、 $H_2S$ 等物质,因此会在同一吸附塔内装有不同种吸附剂,如表3所示。当负荷过大、流量波动、局部流速过大、压载物重量不足时,吸附剂会出现混合现象,混合后的吸附剂容易吸附能力降低,发生杂质穿透现象,为保证目标产物量,需要对吸附时间进行调整,降低吸附时间,增加再生次数,导致氢气回收率下降。

表3 提浓段吸附剂一览表

名称	主要规格	作用
DKT-100	$\phi 3 \sim 5$ 白色球状	起气流分布、脱水
DKT-200	$\phi 2 \sim 4$ 白色球状	脱水、 $CO_2$
DKT-15B	$\phi 1.8 \sim 2.0$ 黑色柱状	脱 $CO_2$ 、 $CO$ 、烃
DKT-611	$\phi 3 \sim 6$ 黑色柱状	脱烃、 $CO$
DKT-300a	$\phi 1.6 \sim 2.5$ 灰色球状	脱 $CH_4$ 、 $CO$ 、 $N_2$ 、 $O_2$

### 3.5 均压

均压是高压吸附塔与低压吸附塔之间进行的压力均衡的方法,是保证系统连续性循环、充分回收系统内氢气的不可或缺的步骤<sup>[25]</sup>。不同的均压次数和均压后的压力差会对氢气收率有一定的影响。过少的均压次数会造成“死区”的氢气无法充分回收,造成氢气回收率下降<sup>[26]</sup>。理论上,均压次数越多,氢气的收率会升高,但是在含有反冲洗的装置中,过多的均压次数,反而会造成产品氢的回收率降低。每一阶段的均压,都是以两吸附塔的压力差为零为目标,这样可以使回收率处于最优化。但是在系统运行期间,均压后两塔或多或少存在着一定的压差,这会造成氢气回收率下降。

### 3.6 吸附时间

在变压吸附制氢中,通常认为吸附时间越长,单位时间内解析的次数就会降低,从而氢气回收率会上升。但是,在吸附剂数量一定的情况下,当吸附时

间过长时,吸附剂吸附杂质可能会达到过饱和,这会使杂质进入氢气当中,进而氢气纯度会下降,更有甚者会造成吸附剂“中毒”,导致氢回收率下降<sup>[27]</sup>。因此,变压吸附操作时间设定需要以氢气纯度为前提,尽可能增加吸附时间,使得氢气回收率处于高位。

#### 4 提高荒煤气制氢中变压吸附氢回收率的措施

##### 4.1 降低原料气杂质含量

降低原料气中杂质含量,需从源头上解决。装置进行了如下工艺设备的优化:①适当降低进入 PSA 提浓段原料气的温度,从原设计 40℃ 降为 28℃,这样会使得一部分水和轻质油分离出来;②对进口分离器进行改进,增加分离精度 >6 μm 的高效叶片分离单元;③增加荒煤气净化装置,例如使用电捕焦+低温水降温除油技术,除去原料气中的焦油

含量,经过采用以上技术,原料气中焦油含量由 188 mg/m<sup>3</sup> 降低到 28 mg/m<sup>3</sup>。采用湿法脱硫和本单位自主研发的控硫技术相结合,使硫化氢含量为 155.9 mg/m<sup>3</sup> 来维持变换催化剂活性;④加强操作管理,严格控制工艺指标,加减负荷的速率,防止系统波动。

##### 4.2 控制程控阀内漏

由于高频次的开、闭,程控阀内漏是不可避免的,但可以通过随时监控、判断以及检修阀门减小由于阀门内漏而造成的氢气回收率降低。①装置在程序上给予一定的设置,来减少阀门问题带来的影响,设置切塔程序,当出现阀门影响系统运行,系统可以对本塔进行切出,可以由 10-4-3 变为 9-4-3(见表 4)或者 8-4-2 程序运行(见表 5);②设置吸附塔塔压与状态的压力报警,准确确定阀门运行情况;③控制塔内空速,减少吸附剂粉化,从而降低程控阀门内漏;④定期检修,减少内漏的概率。

表 4 9-4-3 程序

塔号	状态																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
A	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR
B	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2
C	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	E3	D	V	V
D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	E3	D
E	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2
F	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A
G	A	A	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A
H	A	A	A	A	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A	A	A
I	A	A	A	A	A	A	E1	E2	E3	D	V	V	E3	E2	E1	FR	A	A

表 5 8-4-2 程序

塔号	状态															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
A	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	D	V	V	E2	E1	FR
B	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	D	V	V	E2
C	V	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2	D	V
D	D	V	V	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A	E1	E2
E	E1	E2	D	V	V	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A	A	A
F	A	A	E1	E2	D	V	V	E2	E1	FR	A	A	A	A	A	A
G	A	A	A	A	E1	E2	D	V	V	E2	E1	FR	A	A	A	A
H	A	A	A	A	A	A	E1	E2	D	V	V	E2	E1	FR	A	A

注:A 代表吸附,R 代表均升,D 代表均降,V 代表真空。

### 4.3 控制真空度

真空度决定吸附剂再生程度。在同等条件下,吸附剂再生越好,氢气回收率会有一定上升。控制真空度需要做以下几个方面工作:①降低背压,被压降低后逆放气释放使得压力差增加,逆放更为容易,同时水环真空泵的有效功率上升,真空度会提高。当背压从 30 kPa 降低到 23 kPa,氢气回收率可提高 0.5%。②良好的动力设备运行。动力设备直接决定系统真空度的高低,保证良好的设备运行需做到合理选型、良好对中、减小振动、降低摩擦、防止泄露以及合适的干燥度。

### 4.4 降低吸附剂粉化和混合

降低吸附剂粉化需要从以下几点着手:①减少装填运输时的磨损,运输中使用不易振动的包裹物,在装填时候可以适当降低吸附剂装填的垂直距离,减小落差;②控制负荷的加减速率,降低流量波动;③减少气体出现偏流的概率,严格按照装填手册执行,防止局部堆积,同时需要降低原料气液态和固态物质,防止吸附剂凝结;④设定好程控阀的开启速率,防止程控阀快速开启时,高压端瞬时空速过大而引起的吸附剂的粉化与混合;⑤适当增加压载物重量,增加压载物是防止吸附剂床层由固定床变为流化床的一种手段,可以较好、有效地降低吸附剂粉化和混合的概率。

本装置通过对荒煤气中硫化氢加以脱出,硫化氢控制在  $155.9 \text{ mg/m}^3$  左右,对吸附塔的内部增加了再分布器,既增加了吸附塔的压载力,又解决了气体的偏流问题,也对 PSA 进口分离器进行改造,增加相应的内件,使得分液效果大大提高,降低了液态物质进入吸附塔的可能性。通过一系列技改,大大减少了吸附剂的粉化和混合,增加了吸附剂的使用寿命和安全性,同时也在一定程度上提高了氢气的回收率。

### 4.5 吸附时间与均压的控制

合理的均压次数、适当的均压速率是提高氢气回收率的方法之一,在保证产品氢气纯度的前提下,尽可能延长吸附时间。通过优化管理和操作,对吸附时间随时追踪,使得吸附时间提高 4 s,即由 120 s 提高到 124 s,进而提高变压吸附制氢的氢气回收率。通过重新核算不同负荷下管线的尺寸和对应阀门开启速率,对一均和逆放气管线进行一定的加粗,特别是逆放气管线由 DN300 变为 DN500,以减小均压降压力和均压升压力的差值,同时对程控阀开启设定一定的程序,防止初始均压速率过快,出现吸附

塔内局部流速过快的问题。从而提高氢气回收率。

## 5 结论

影响氢气回收率的原因包括原料气杂质含量、真空度、程控阀、吸附剂、吸附时间以及均压等,新疆宣力环保能源股份有限公司通过使用电捕焦+低温水降温除油技术,使得焦油含量由  $188 \text{ mg/m}^3$  降低到  $28 \text{ mg/m}^3$ ,使用湿法脱硫与本单位控硫技术相结合,可以精准控制硫化氢含量为  $155.9 \text{ mg/m}^3$ 。对 PSA 提浓进口气液分离器内增加高效叶片分离,较大程度降低变换气中液态组分进入 PSA 的可能性。逆放气管线由原始的 DN300 变为 DN500,保证了系统的运行稳定。吸附塔的内部增加了再分布器,既增加了吸附塔的压载力和气体的均流问题,同时减少了吸附剂的粉化问题。真空泵背压由运行的 30 kPa 降低到 23 kPa,使得氢气回收率提高 0.5%。通过优化管理和操作,使吸附时间提高 4 s,由 120 s 提高到 124 s,采用切塔技术,吸附塔由 10-4-3 变为 9-4-3 或者 8-4-2 程序运行,可以完成内漏程控阀在线检修。通过一系列的改造,荒煤气制氢装置能平稳安全地连续生产,且年操作时间达到 8 000 h,同时使得变压吸附氢气回收率由原始运行的 90.0%~92.3% 提高到 95% 左右,实现了变压吸附氢气回收率的提升,确保了变压吸附制氢装置的高效、稳定、经济运行。

## 参考文献

- [1] 刘昊,吴嵘,吴素芳.反应吸附强化焦炉煤气蒸汽重整制氢技术评价[J].天然气化工:C1 化学与化工,2018,43(6):84-89.
- [2] 庄贵阳.我国实现“双碳”目标面临的挑战及对策[J].人民论坛,2021,(18):50-53.
- [3] 苏海兰,史立杰,高珠,等.甲醇水蒸气重整制氢研究进展[J].工业催化,2019,27(4):28-31.
- [4] 王治斌,孙来芝,陈雷,等.生物油水蒸气催化重整制氢研究进展[J].化工进展,2021,40(1):151-163.
- [5] 王奕然,曾令志,姜舒洁,等.天然气制氢技术研究进展[J].石化技术与应用,2019,37(5):361-366.
- [6] 迟洋河.天然气制氢装置优化改造[D].大庆:东北石油大学,2016.
- [7] 骆永伟,朱亮,王向飞,等.电解水制氢催化剂的研究与发展[J].金属功能材料,2021,28(3):58-66.
- [8] 俞红梅,邵志刚,侯明,等.电解水制氢技术研究进展与发展建议[J].中国工程科学,2021,23(2):146-152.
- [9] 田伟,阎富生,黄永红,等.碱土金属对石油焦直接制氢的模拟分析[J].现代化工,2018,38(7):208-213.

(下转第 250 页)

35 000 kg/h 的安全阀,孔板+安全阀的设置使得系统在正常操作时不影响粗甲醇分离器液位控制阀的调节,在串压事故工况下可控制泄放量,保证低压系统设备及火炬管网的安全性,相对方案一工程改动量小,无需全厂停车。

#### 4.3.3 方案三:增设开关阀

该项目串压的风险的根本原因是由于液位低低联锁时液位调节阀无法关闭导致,现有控制方案中一旦调阀发生故障即意味着该控制回路失效,无法作为独立的保护层。因此可考虑增设紧急切断阀,当液位低低时直接关闭紧急切断阀,阻断串压风险的发生。流程示意图见图 3。

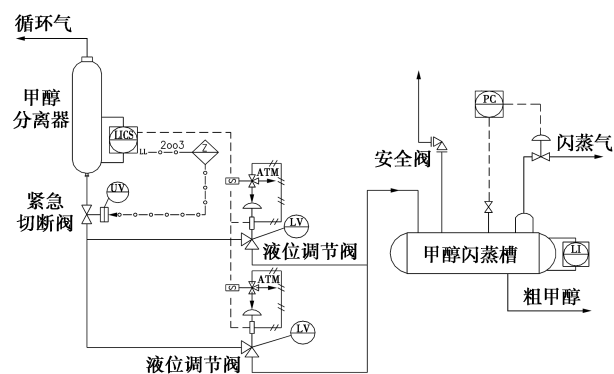


图 3 增设开关阀方案示意图

该紧急切断阀的关闭时间不得大于串压发生时低低液位到失去液位的时长,根据第 4.2.2 条计算,关闭时长不得大于 2 min。紧急切断阀的设置可作为独立保护层,阻断串压风险的发生。本方案的优点是从本源上消除了串压风险,缺点是投资成本

较高。

根据上述分析并结合现场检修时间、采购周期等因素,最终选择方案二,即增设限流孔板+安全阀的方案。

## 5 结论

甲醇装置存在多处串压隐患,工程设计中首先应对串压后果、引发因素进行逐一分析,采取安全合理、经济可行的方案,其中首要因素是确保低压系统安全泄放设施满足串压工况需求。本文中所举案例在工程设计中较为典型,由于项目实施过程中设备采购顺序不同,安全阀泄放量往往仅按工艺计算值设定,未根据液位调节阀最终选型进行核算,导致泄放量不满足实际要求。另外,在设计中还应结合串压系统的上下游统筹考虑,在保证安全性的前提下,考虑投资、采购周期、施工难度等综合因素,选择最佳安全防控措施。

## 参考文献

- [1] 国家经济贸易委员会.SY/T 10043—2002.泄压和减压系统指南[S].北京:中国海洋石油总公司研究中心开发设计院,2002.
- [2] 蹇江海.加氢原料缓冲罐串压事故动态模拟研究[J].事故分析与预防,2020,20(1):1-4.
- [3] 庄力健,朱建新,陈学冬,等.石化装置串压问题及其安全完整性评估[J].石油化工设备,2011,40(4):20-24.
- [4] 中华人民共和国化学工业部.HG/T 20570.2—95.安全阀的设置和选用[S].北京:化工部工程建设标准编辑中心,1996.
- [5] 中华人民共和国化学工业部.HG/T 20570.15—95.管路限流孔板的设置[S].北京:化工部工程建设标准编辑中心,1996. ■
- [6] (上接第 245 页)
- [7] 刘书朋.煤和天然气制氢工艺技术经济分析[J].炼油技术与工程,2010,40(7):56-60.
- [8] 孙军,李芳略.低压水煤气制氢工艺综述[J].广东化工,2019,46(5):155-157.
- [9] 唐通鸣,裴一,倪红军,等.氢气纯化方法和装置[J].化工新型材料,2015,43(5):254-257.
- [10] 黄伟荣.煤制氢膜分离与蜡油加氢耦合流程设计与优化[D].大连:大连理工大学,2019.
- [11] 殷文华,李克兵,赵明正,等.焦炉煤气净化提取氢燃料电池用氢气[J].天然气化工:C1 化学与化工,2019,44(1):87-90.
- [12] 梁其煜,李式模,邵皓平.变压吸附技术的发展[J].低温工程,1997,99(5):7-11.
- [13] 殷文华,罗英奇,吴巍,等.变压吸附技术在合成氨行业的应用和发展[J].低温与特气,2015,33(1):45-49.
- [14] 王海岗.PSA 装置程控阀故障原因分析及解决对策[J].广东化工,2019,46(14):163-164,169.
- [15] 何东荣,周向辉,张东辉.利用 ASPEN-ADSIM 模拟变压吸附分离过程[J].天然气化工:C1 化学与化工,2009,34(3):11-15.
- [16] 余希立.变压吸附制氢工艺的影响因素及常见问题分析[J].化工与医药工程,2019,40(1):6-8.
- [17] 赵万凯,王迎迎.ZBE 型水环真空泵汽蚀分析及改造方案介绍[J].节能,2016,35(4):79-80.
- [18] 陆彬,蒋彦龙.电厂水环式真空泵汽蚀原因分析及改造措施探究[J].电子测试,2019,(24):110-111,19.
- [19] 严家驷,余晓福,王永青.水和水蒸气热力性质图表(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2004.
- [20] 王森.焦炉气制甲醇系统焦油吸附剂异常粉化原因及解决方案研究[D].北京:北京化工大学,2016.
- [21] 刘长绪.制氢变压吸附装置工艺技术研究[D].大连:大连理工大学,2012.
- [22] 祝显强,刘应书,杨雄,等.我国变压吸附制氧吸附剂及工艺研究进展[J].化工进展,2015,34(1):19-25.
- [23] 翟琛.变压吸附提氢装置氢收率低的原因分析及改进措施[J].中氮肥,2018,(5):42-44.
- [24] 梁力友,代茂节.变压吸附制氢工艺及其技术进展[J].乙烯工业,2017,29(4):18-20,5. ■