

# 焦炉煤气变压吸附制氢装置五塔与六塔工艺方案的比较

张志刚<sup>1</sup>, 张月胜<sup>1</sup>, 张天来<sup>2</sup>, 穆根来<sup>2</sup>

(1. 新钢公司设计院和棒材厂, 江西 新余 338001; 2. 成都天蓝化工科技有限公司, 四川 成都 610041)

**摘要:**以氢气产能1 000 m<sup>3</sup>/h的焦炉煤气变压吸附制氢装置为例,介绍了常用的五塔和六塔流程2种工艺技术方案,分析了其工艺配置、运行程序切换方式和建造成本的差异,并说明其各自的适用场合与优劣。

**关键词:**变压吸附;焦炉煤气;制氢;工艺方案;配置;比较

**中图分类号:**TQ028.15;TQ522.61

**文献标识码:**A

**文章编号:**0253-4320(2010)03-0081-03

## Comparison of five-towers and six-towers of PSA process technology for hydrogen production with coke-oven gas

ZHANG Zhi-gang<sup>1</sup>, ZHANG Yue-sheng<sup>1</sup>, ZHANG Tian-lai<sup>2</sup>, MU Gen-lai<sup>2</sup>

(1. Design Institute and Club Material Factory, Xinyu Iron & Steel Co., Ltd., Xinyu 338001, China;

2. Chengdu Tianlan Chemical Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** With the unit of pressure swing adsorption (PSA) of coke-oven gas with H<sub>2</sub> production capacity of 1000 m<sup>3</sup>/h as a case, the two processes of the five-towers and six-towers process are introduced, respectively. The differences of the two processes in collocating, running procedure switch quomodo and building cost are compared and analyzed. The respective applying occasions and its strength and weakness of the two processes are signaled.

**Key words:** pressure swing adsorption (PSA); coke-oven gas (COG); H<sub>2</sub> production; process technology; collocating; comparison

以焦炉煤气(COG)为原料,采用变压吸附(PSA)气体分离技术制取高纯度的氢气(99.999%),制氢成本低,仅为电解水制氢的1/4~1/3,同时还具有工艺简单可靠、运行费用低、操作弹性大、自动化程度高、投资省、便于维护等特点,因此竞争优势明显。目前,我国冶金行业已有多家企业建有焦炉煤气变压吸附制氢装置<sup>[1]</sup>,为冷轧产品的热处理提供保护气源;这一技术的推广应用降低了氢气生产成本,提升了制氢工艺技术水平。针对钢厂保护气的情况,产能1 000 m<sup>3</sup>/h制氢规模的生产装置通常采用五塔或六塔配置的变压吸附流程。本文从工艺技术的角度介绍了五塔和六塔流程的相关配置、运行程序切换方式的差异、建造成本的比较,并说明了它们各自的适用场合。

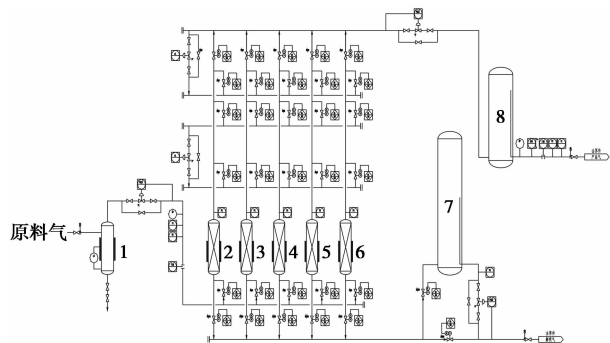
### 1 2种工艺方案的配置比较

变压吸附的基本原理是利用气体组分在固体材料上随着压力变化时吸附特性的差异,通过周期性的压力升降或变换过程实现气体的分离或提纯<sup>[2]</sup>。

变压吸附法分离提纯氢气,适宜的吸附操作压力为0.5~3.0 MPa。

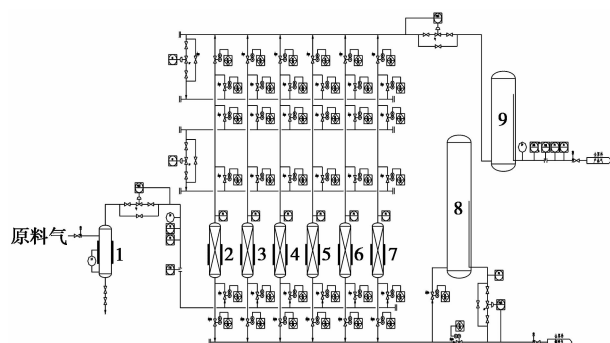
焦炉煤气是炼焦过程中的副产物,通常1t原料可得300~500 m<sup>3</sup>的副产气体。该气体压力低,除含有大量H<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和一定量的N<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、O<sub>2</sub>外,其他组分相当复杂,如焦油、萘、硫化物、高碳烃类等<sup>[3]</sup>。作为保护气体使用的产品氢纯度要求高,因而工艺流程由压缩工序、预处理工序、变压吸附工序和净化工序构成。预处理工序可有效脱除焦炉煤气中的硫化物和重组分杂质,保证了PSA吸附剂的长期使用;净化工序采用常温脱氧工艺脱除微量氧<sup>[4-5]</sup>;本文是在压缩工序、预处理工序和净化工序等配置相同的前提下,比较了2种变压吸附工序的工艺技术方案。

变压吸附工序设计操作压力1.7 MPa,产品氢气输出压力1.6 MPa,五塔和六塔变压吸附流程图分别见图1和图2,其工艺方案的性能指标和配置见表1,它们的运行时序列于表2和表3。



1—气液分离器;2,3,4,5,6—吸附塔;7—解吸气缓冲罐;  
8—产品气缓冲罐

图 1 五塔流程示意图



1—气液分离器;2,3,4,5,6,7—吸附塔;8—解吸气缓冲罐;  
9—产品气缓冲罐

图 2 六塔流程示意图

表 1 五塔工艺方案与六塔工艺方案的性能指标和主要配置

| 项目  | 五塔工艺(方案 A)             | 六塔工艺(方案 B)             |
|---|------------------------|------------------------|
| 原料气处理能力/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 2130                   | 2130                   |
| 产品气输出能力/ $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ | 1000                   | 1000                   |
| 氢收率/%                                     | 80                     | 80                     |
| 运行方式                                      | 5-1-3/P                | 6-2-3/P                |
| 吸附塔数/台                                    | 5                      | 6                      |
| 进料塔数/台                                    | 1                      | 2                      |
| 均压次数                                      | 3                      | 3                      |
| 吸附剂再生方式                                   | 冲洗再生                   | 冲洗再生                   |
| 硬件配置                                      |                        |                        |
| 吸附塔规格( $\Phi/V$ )                         | 1200 mm/7 $\text{m}^3$ | 1000 mm/4 $\text{m}^3$ |
| 吸附剂(自下而上)                                 | 活性氧化铝/活性炭/分子筛          | 活性氧化铝/活性炭/分子筛          |
| 吸附剂总质量/kg                                 | 26390                  | 18100                  |
| 程控阀数量/台                                   | 32                     | 38                     |
| 控制系统型号(西门子)                               | S7-300                 | S7-300                 |
| 吸附塔设备质量/ $\text{kg} \cdot \text{台}^{-1}$  | 5500                   | 3600                   |
| 吸附塔总质量/kg                                 | 27500                  | 21600                  |
| 空塔线速度/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$     | 0.032                  | 0.023                  |
| 吸附塔高径比                                    | 5                      | 5                      |

表 2 方案 A 运行时序表 5-1-3/P

| 分周期  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 步位   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| 时间 s | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| A 塔  |    | A  |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R | FR |    |
| B 塔  | 1R |    | FR |    | A  |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS |
| C 塔  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    | A  |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  |
| D 塔  | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    | A  |    | 1D | 2D | PP |
| E 塔  | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    | A  |    |

表 3 方案 B 运行时序表 6-2-3/P

| 分周期  | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 步位   | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| 时间 s | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| A 塔  |    |    | A  |    |    |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R | FR |    |
| B 塔  | 1R |    | FR |    |    | A  |    |    |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS |
| C 塔  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    |    | A  |    |    | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  |    |
| D 塔  | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    |    | A  |    |    | 1D | 2D | PP |    |
| E 塔  | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    |    | A  |    |    |    |
| F 塔  |    | A  | 1D | 2D | PP | 3D | D  | P  | 3R | 2R | IS | 1R |    | FR |    |    |    | A  |

由表 2、表 3 可知,装置运行时,2 种工艺各个吸附塔所经历的步骤是相同的,都包括吸附、三级梯度

压力均衡降、顺向放压、逆向放压、冲洗、三级梯度压力均衡升、终充升压等过程;由表 1 可知,两者的设

计能力、压力均衡次数、冲洗再生方式、吸附剂配比、氢气产率亦相同,吸附塔主要工艺设计参数空塔线速度和高径比在相近的范围;它们的区别在于六塔配置采用2个吸附塔同时进料的运行方式,五塔配置则受时序排列的限制为一塔进料。在方案B流程中,处于吸附状态的吸附剂占吸附剂总量(吸附状态+再生状态)的比例为1/3,方案A流程中这一比例为1/5,也就是说方案B的吸附剂利用率高于方案A。由此导致的结果是,在处理相同原料气的情况下,方案B吸附剂用量将低于方案A。从表1中列出的2种方案的主要设备配置情况和图1与图2可以看出,方案B吸附剂总量为18 100 kg,方案A中为26 390 kg,相差8 290 kg;同时方案B吸附塔设备钢材总质量要低约5 900 kg。从上述角度看,方案B优于方案A。同时也要看到,增加1个吸附塔的配置,需要增加与塔配套的程序控制阀6台和管路以及控制仪表系统,六塔流程安装工程费用和自控系统投资费用略高于五塔流程。

## 2 运行程序切换方式的差异

方案A的主要运行方式为5-1-3/P,方案B主要运行方式为6-2-3/P。当生产工况发生较大变化时(如需要低负荷运行、程控阀出现故障等)变压吸附系统可以改变运行程序以适应新的工况,从而保持优化的操作性能指标,或实现不停车检修(这是提高变压吸附装置运行可靠性的一个关键)。2种工艺方案可以实现的运行方式如表4。

表4 2种工艺方案的运行方式

| 项目     | 方案A     | 方案B     |
|--------|---------|---------|
| 主运行方式  | 5-1-3/P | 6-2-3/P |
| 其他运行方式 | 4-1-2/P | 6-1-4/P |
|        |         | 5-1-3/P |
|        |         | 5-2-2/P |
|        |         | 4-1-2/P |

变压吸附装置压力均衡次数增加,有利于产品气收率的提高。方案B可以实现的运行方式较多,并且有4次均压操作的手段,能够保持较高的氢气收率;但是该方案单个吸附塔设备尺寸相对较小,程序切换后多为一塔进料方式运行,因此装置处理气量负荷将大幅度降低。例如由6-2-3/P主运行方式切换成5-1-3/P,装置负荷在设计能力的60%左右。方案A切除1个塔后只能采取减少均压次数方式运行,装置处理气量可维持不变,但其氢气收率降低5%~8%<sup>[6]</sup>。

## 3 建造成本比较

产能1 000 m<sup>3</sup>/h制氢规模的焦炉煤气制氢装置,投资费用约为1 000万元,其中变压吸附工序投资在400万元左右。方案A与方案B变压吸附装置建造成本比较列于表5。

表5 建造成本比较

| 项目             | 方案A/万元 | 方案B/万元    |
|----------------|--------|-----------|
| 非标设备购置费        | 基数 M1  | M1 - 8.2  |
| 专用吸附剂          | M2     | M2 - 11.0 |
| 程序控制阀门         | M3     | M3 + 3.2  |
| 自控仪器仪表         | M4     | M4 + 1.2  |
| 自控微机           | M5     | M5        |
| 电气             | M6     | M6 + 0.2  |
| 分析仪器           | M7     | M7        |
| 安装工程费用         | M8     | M8 + 2.5  |
| 土建工程费用         | M9     | M9        |
| 工程设计费(含编程和组态费) | M10    | M10 + 2   |
| 差额             | 基数     | 基数 - 10.1 |

五塔流程方案中非标设备和吸附剂购置费用比六塔流程高19.2万元,程控阀和控制仪表以及安装工程费用比六塔流程低9.1万元。2种方案比较,六塔流程节省投资约10.1万元。

## 4 结语

产能1 000 m<sup>3</sup>/h焦炉煤气变压吸附制氢装置,六塔工艺方案吸附剂的利用率较高、投资省,运行方式灵活,笔者首先推荐采用。特别是在焦炉煤气价格相对较高,要提高产品氢气收率,增加经济效益,预期装置低负荷运行几率较大的情况下更显其优越性。

五塔工艺方案的优点是装置扩能的潜力大。因为吸附塔尺寸相对较大,增加1个塔的配置,改造成六塔流程即可实现对原料气处理能力的大幅提高。

## 参考文献

- [1] 徐世洋,张敏. 浅谈变压吸附技术在焦炉煤气制氢中的应用[J]. 上海化工,2006,31(7):29-32.
- [2] Yang R T. 吸附法气体分离[M]. 北京:化学工业出版社,1991.
- [3] 陈冠荣,化工百科全书[M]. 北京:化学工业出版社,1997.
- [4] 古共伟,陈健,魏玺群. 吸附分离技术在现代工业中的应用[J]. 合成化学,1999,7(4):346-352.
- [5] 郑学. 焦炉气变压吸附制氢技术的应用[J]. 山西化工,2007,27(4):69-70.
- [6] 汤洪. 变压吸附装置中均压设计的讨论[J]. 化工设计,2003,13(1):15-19. ■