

H₂变压吸附（PSA）技术在HDPE装置中的应用

梁传飞

中石化（天津）石油化工有限公司

摘要：变压吸附（PSA）技术是最近几十年在工业应用中新出现的气体分离技术，是渗流理论在工业中的具体应用。H₂ PSA技术具有氢气纯度高、装置稳定可靠等特点。本文重点探讨H₂变压吸附技术的原理、工艺特点及在南港50万吨/年HDPE装置中的应用。

关键词：PSA；变压吸附技术；HDPE；技术特点

【DOI】 10.12252/j.issn.2096-6288.2022.08.113

前言

变压吸附（PSA）技术是一种综合技术，能够有效地将多种气体分离。其工作原理是利用吸附剂，根据变压吸附的原理，通过控制温度，提取气体。通常，分子筛被选作吸附剂。近年来，这种技术在H₂的生产提纯中得到了广泛的应用。我国已经成功开发出了不同参数规格下的H₂提取程序，并支持不同参数规格气体提取切换。这些程序的H₂回收率超过了90%，纯度高达99.9%。

一、PSA在HDPE装置中的应用

南港50万吨/年HDPE装置采用INEOS公司的Innovenes工艺，在齐格勒催化剂模式下H₂作为链转移剂，可以调节聚合物的相对分子量大小，并且H₂对于催化剂的活性也有一定的影响，能够改变聚合反应的速率。由于装置界区外提供的H₂中甲烷含量近5%，甲烷含量过高对Innovenes工艺会产生不利的影 响，尤其是CH₄作为齐格勒催化剂的毒物，会使催化剂失活，导致催化剂浪费产生大量非标产品。采用H₂变压吸附（PSA）技术提高氢气的纯度，降低杂质含量以满足工艺和产品要求^[1, 2]。

在HDPE装置中，氢气变压吸附技术已广泛运用于实际生产中，为HDPE的生产过程提供了可靠的氢气供应。在HDPE装置中，氢气的主要作用是作为分子量调节剂，用于控制聚合物的分子量分布。通过向聚合反应体系中注入氢气，可以降低聚合物的分子量，从而改善生产出的HDPE树脂的性能。

氢气变压吸附技术在该领域的应用主要体现在以下几个方面：1. 氢气纯度提升：通过变压吸附过程，可以将含有杂质的工业氢气进行纯化处理，提高氢气的纯

度，以满足HDPE装置对于氢气纯度的要求。2. 氢气流量和压力控制：通过变压吸附技术，可以精确控制氢气的流量和压力，确保在聚合反应过程中氢气的稳定供应。3. 通过采用变压吸附技术提纯氢气，可以降低生产成本，可以减少从外部购买高纯度氢气的需求，从而降低HDPE装置的生产成本。4. 环保优势：与传统的化学提纯方法相比，氢气变压吸附技术不需要使用化学试剂，不会产生废液和废气等污染物，具有环保优势。

在HDPE装置中应用氢气变压吸附技术时，需要注意以下几点：1. 设备选型和设计：需要根据HDPE装置的实际情况选择合适的变压吸附设备，并设计合理的工艺流程，以确保氢气的供应稳定可靠。2. 操作和维护：需要严格控制变压吸附设备的操作参数，如压力、温度、流量等，并定期进行维护保养，以保证设备的正常运行。3. 安全措施：由于氢气具有易燃易爆的特性，因此在应用过程中需要采取相应的安全措施，如设置安全阀、防爆装置等，确保生产过程的安全性。

综上所述，氢气变压吸附技术在HDPE装置中具有广泛的应用前景。通过合理设计和操作，可以有效地提高HDPE装置的生产效率和产品质量，降低生产成本和环保负荷，为工业生产带来显著的经济效益和社会效益^[2-3]。

二、工艺原理

变压吸附技术的核心原理是利用特定吸附剂对不同气体的选择性吸附能力。也就是说，不同的气体（我们称之为吸附质）在特定吸附剂上的吸附量是不同的，同时特定气体的吸附量会随着压力的变化而改变。这两个特点使我们能够分离气体混合物并再生吸附剂。

为了使被吸附的杂质成分解吸并使吸附剂得以再

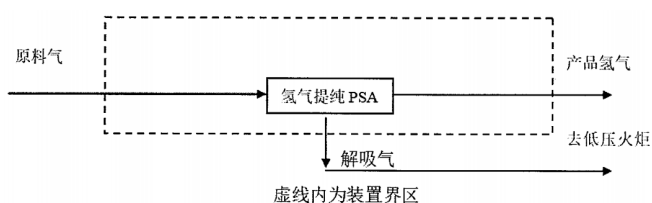
生，我们需要降低吸附床的压力。本装置采用“逆放降压+冲洗”的解吸工艺，这种工艺可以尽可能降低杂质组分的分压，从而使吸附剂得到更彻底的再生。

三、工艺流程叙述

(一) 流程简述

南港50万吨/年HDPE装置氢气PSA单元设计界区为原料气进单元边界，解析气出单元边界，产品气经过氢气增压机增压后进入反应器，变压吸附单元产生的排放气排放至火炬系统。

界区划分图：



原料气在3MPa，约16℃的条件下经气液分离罐后去变压吸附系统提纯氢气，获得产品气送出界外。

变压吸附撬块由4台吸附器组成，在任意时刻，都有吸附器处于吸附步骤的不同阶段，同时也有吸附器处于再生的不同阶段。结束吸附的吸附器经过多次均压降压过程，回收其中的有效气体，均压降结束后通过顺放为其他吸附塔提供冲洗再生气，在顺放结束后，通过逆放过程将压力降低至微正压，然后使用顺放时的冲洗气进行冲洗再生，再生效果更彻底，再生无动能的消耗。

经过再生合格的吸附器，经过多次均压升压及最终升压过程，将压力升至吸附压力，为下一次吸附做好准备。解吸气在调节稳压系统稳定压力和组成后去火炬。

(二) 变压吸附单元的工作过程

PSA采用了4-1-4/P工艺流程，这意味着在任何时候，总有一个吸附塔处于进料吸附的状态。该工艺流程包括吸附、连续多次均压降、顺放、逆放、冲洗、多次均压升压和最终升压等步骤，以确保吸附和再生的顺利进行。

具体步骤简述如下：

A、吸附过程

在吸附压力下，原料气以约16℃的温度从塔底进入正在进行吸附的吸附塔。在多种吸附剂的依次选择吸附

作用下，杂质被牢牢吸附，而氢气则作为产品从塔顶顺畅流出。

B、均降压过程

在吸附过程结束后，我们将来自较高压力的氢气从塔内顺着吸附方向放入其他已完成再生的较低压力吸附塔。这个过程不仅实现了降压，更重要的是回收了床层死空间中的氢气。

所谓的“床层死空间”，是指吸附塔中未被有效利用的空间。在变压吸附工艺中，为了更好地利用吸附剂，我们需要确保吸附塔内的压力在吸附过程中保持稳定。然而，由于操作条件的限制，吸附塔内的压力在吸附过程中会发生波动，这就导致一部分氢气滞留在吸附塔的死空间里。

为了解决这个问题，我们采用了均压降压的方法。具体来说，当一个吸附塔完成吸附过程后，我们会将来自较高压力的氢气顺着吸附方向引入这个吸附塔。这个过程会使得吸附塔内的压力逐渐降低，同时将滞留在死空间里的氢气回收。

C、顺放过程

在均压降压过程结束后，如果吸附前沿尚未到达床层出口，我们会顺着吸附方向将吸附塔的压力降低至约0.26MPa。这个步骤是为了确保床层中的所有杂质都被充分吸附，并使氢气得以更顺畅地流动。

在这个过程中，顺放气将被储存到专门的顺放气缓冲罐中。这个缓冲罐的作用是调节气体流量的波动，使其保持稳定，以供后续使用。通过这种方式，我们可以确保氢气的平稳供应，并防止因压力波动而可能导致的任何不利影响。

D、逆放过程

在均压降压过程结束后，如果吸附前沿已经到达床层出口，我们会逆着吸附方向将吸附塔的压力降低至约0.02MPa。这个压力水平是为了让杂质能够更容易地从吸附剂中解吸出来。

在此过程中，被吸附的杂质开始大量从吸附剂中解吸出来。这些解吸的气体被称为逆放解吸气，它们将被收集并储存在解吸气缓冲罐中。这个缓冲罐的作用是提供一个平稳的环境，以调节气体流量的波动，并确保其

稳定供应。

之后，我们会将缓冲罐中的逆放解吸气进行缓冲稳压处理。这个步骤是为了确保气体的压力稳定，并满足后续工艺流程的需求。经过缓冲稳压后，这些气体将被送往界区外，供进一步的加工或使用。

E、冲洗

为了使吸附剂得到深度再生，我们使用顺放气逆着吸附方向对吸附床层进行冲洗再生，确保再生过程更加彻底。为了确保再生效果，该过程的时间应该尽可能长。

表1 处理前后组分对比表

组分	处理前 %	处理后
H ₂	95	≥99.5%
O ₂ +H ₂ O	0.0005	≤5ppm
N ₂	0.05	≤500ppm
CO	0.0005	≤1ppm
CO ₂	0.0005	≤1ppm
C2	0.1	≤20ppm
总硫	0.0001	≤1ppm

(三) 装置切换

为了确保PSA提纯单元长周期稳定运行，装置必须考虑切换，其主要目的是保证在个别阀门或设备出现故障时，装置能维持生产，不至于对前后工段产生太大的影响，当故障消除后，能迅速恢复正常生产。PSA提纯单元采用以4塔为主的工艺流程运行方式，当与某一吸附器相连的程序控制阀或控制阀门开关的元件出现故障时，可根据对产品气的要求情况，自动（或手动）地转换为3塔运行方式，任何一塔的阀门设备出现故障均可切换至其他三塔正常运行。

(四) 装置故障分析

程控阀发生故障主要有两种情况：

1) 电磁阀及相关回路发生故障，这种情况最多，几乎所有故障属于此种情况。

2) 阀门本体发生故障。

对于第1种情况，只需检查电磁滑阀及相关线路，阀门无需拆卸，通常在数分钟就可修复。当PSA提纯单元发生这种故障时，通过程控阀阀位反馈报警信号结合吸附塔压力判断报警信号的共同作用，PSA提纯单元程序自动切除故障吸附塔，由4塔切为3塔运行。对第2

种情况，需拆装阀门，由于需要对阀门相连管道进行置换，用时相对较长，需将整个PSA系统停车并隔离出来进行处理。

程控阀在变压吸附装置中扮演着至关重要的角色，在完成整个工艺过程的关键部件。由于变压吸附装置的工艺特性，程控阀需要频繁动作，因此对其性能的可靠性有着极高的要求。程控阀的操作指标和要求远高于一般阀门，这不仅体现在对阀门密闭性能、启闭速度和调节能力的需求上，而且还必须具备在长期、频繁动作下的可靠性和安全性。

为了保证变压吸附装置的正常运转和产品的质量，程控阀的操作性能至关重要。快速的启闭速度可以确保气体流量的稳定，避免产品纯度受到波动的影响。良好的密闭性能则是保证装置运行效率的关键因素，可以有效降低气体泄漏的可能性。此外，程控阀还必须具备强大的调节能力，可以根据工艺需求精确控制气体流量和压力。

在长期、频繁的动作下，程控阀的可靠性和安全性同样不容忽视。为了确保在各种工况下的稳定运行，程控阀的结构设计必须合理，材料选择必须耐用。同时，还需要进行定期维护和检查，及时发现并解决潜在的问题，以保障整个变压吸附装置的稳定运行。

四、结语

伴随着科技的进步和技术人员的不断试验，氢气变压吸附（PSA）技术的运行越来越成熟，氢气变压吸附（PSA）技术在HDPE装置中的应用，有助于减少催化剂和异丁烷的消耗，降低装置的能耗和物耗，并且切换过程波动小，生产平稳，产品质量合格。

参考文献

- [1] 袁欣, 王明臣, 孙明峰. 氢气变压吸附提纯单元改造探讨[J]. 乙烯工业, 2010(3): 4.
- [2] 陈惊波. 变压吸附法净化氢气的研究[J]. 南京工业大学, 2005.
- [3] 布兰得利·P·拉塞尔, 大卫·A·韦格尔, 高塔姆·潘迪. 用于改善的氢气利用的变压吸附和加氢处理的整合: CN201980009937.6[P]. CN111655610A [2023-11-14].