

变压吸附制氮机工艺参数多目标优化设计

陈达

浙江盛尔气体设备制造有限公司 浙江杭州 310000

【摘要】近年来民生领域、科研实验领域以及工业生产领域对氮气的需求都越来越多元化，氮气的纯度和产量以及供应的灵活性不仅会影响工艺效率，也会影响产品品质，变压吸附制氮机具有启动快，调节灵活的优点，并且能够快速响应、按需产氮，是主要的中小规模氮气制备方案。通过分析变压吸附制氮机的工作原理和核心组件，基于其工艺流程探讨变压吸附制氮机工艺参数多目标优化设计。

【关键词】变压吸附剂、制氮技术、优化设计

Multi-objective Optimization Design of Process Parameters for Pressure Swing Adsorption (PSA) Nitrogen Generators by

Chen Da

Zhejiang Sheng'er Gas Equipment Manufacturing Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310000.

【Abstract】In recent years, the demand for nitrogen in civilian, scientific research, and industrial production sectors has become increasingly diversified. The purity, yield, and supply flexibility of nitrogen not only affect process efficiency but also impact product quality. PSA nitrogen generators, with their advantages of rapid startup, flexible regulation, and on-demand nitrogen production, have become the primary solution for small and medium-scale nitrogen production. By analyzing the working principles and core components of PSA nitrogen generators, this study explores the multi-objective optimization design of process parameters based on their operational flow.

【Key words】Pressure swing adsorber, nitrogen production technology, optimization design

变压吸附制氮机是一种通过物理吸附与解吸从空气中提取高纯度氮气的设备，在注塑工艺保护，食品包装冲淡等领域的应用较为广泛，与传统制氮方式相比，变压吸附制氮机是一种利用分子筛吸附原理进行气体分离的设备，具有更高的自动化程度，运行更加稳定，能耗更低。但是变压吸附制氮机制氮纯度低这一问题严重影响了制氮效率和质量，其主要原因在于参数异常，气源污染，部件故障等，所以需要针对这些原因开展多目标优化设计。

一、变压吸附制氮机工作原理

变压吸附制氮机是基于分子筛对氧气的优先吸附特性进行气体分离，在变压吸附制氮机运行过程中，压缩空气经过预处理系统去除杂质之后，会进入装有碳分子筛的吸附塔，分子筛将空气中的氧气，二氧化碳等成分吸附，而氮气会通过管道排出。分子筛接近饱和时，系统会自动切换到减压再生阶段，将吸附塔内的气体排空从而恢复分子筛的吸附

能力。变压吸附技术利用了分子筛对不同分子吸附能力的差异，并通过周期性压力变化实现气体分离，有效实现了高效稳定的氮气生产。

变压吸附制氮机对于氮气和氧气的分离依赖于动力学选择性吸附而非平衡吸附，所以在吸附剂的选择中通常会选择碳分子筛，这种内部微孔结构丰富的吸附剂，氧气分子的扩散速率比氮气分子更快，并且极化率更高，在短时间加压吸附过程中，氧气分子会先扩散到碳分子筛的微孔内，氮气扩散速率慢，可以从吸附塔的出口排出。变压吸附制氮机的变压循环原理是指吸附剂对于气体的吸附容量与压力成正比，可以通过加压吸附和减压解吸的循环过程，使吸附剂能够循环利用，在吸附阶段，原料空气经过压缩和预处理之后，在高压条件下进入吸附塔，解吸阶段通过降压或者抽真空，将吸附剂中的氧气解吸随着废气排出，使吸附剂恢复吸附能力，实现循环利用。

二、变压吸附制氮机的核心组件

（一）吸附塔

变压吸附制氮机是由吸附塔，吸附剂，阀门系统和控制系统组成的。吸附塔通常会采用两塔或多塔并联的结构来实现氮气的连续供应，比如在两塔系统中，一塔在吸附产氮时，另一塔可以同步进行减压解吸，是西福塔可以无间断的产氮，一般吸附塔会选择不锈钢材质，并且对内壁进行防腐处理，避免原料空气中的杂质腐蚀设备。

（二）吸附剂

吸附剂的性能参数直接决定了制氮效率，并且影响着变压吸附制氮机的性能和寿命。在选择吸附剂时要注重吸附剂的吸附容量和选择性，吸附容量是指吸附剂单位质量，可吸附的氧气量，这也决定了吸附塔的总体积和能耗。选择性是指吸附剂对于氧气和氮气吸附的动力学差异，通常选择性越显著，产品的纯度就越高。吸附剂的使用寿命会受到原料气预处理效果，压力以及温度等影响，通常一个优质的碳分子筛可以使用 5~8 年，但如果进气带水或者含油都会导致碳分子筛微孔堵塞或活性位点失效，严重影响碳分子筛的寿命。

（三）阀门系统

变压吸附制氮机的阀门系统通常会选择电磁阀或气动阀，并且要具有快速切换高气密性和耐高压的优势，方案系统中阀门的切换时序直接影响了氮气的纯度和产量，尤其是吸附时间和均压时间，如果吸附时间过长，就会导致没有被吸附的氮气排出，降低氮气产率，如果吸附时间过短，就会导致氧气不能被充分吸附，影响产品的纯度。

（四）控制系统

变压吸附制氮机的控制系统大多采用可编程逻辑控制器或分布式控制系统，具有较高的自动化程度和精准调控能力，控制系统可以通过传感器对系统的压力，流量，纯度等进行实时监测。对阀门的时序与吸附压力自动调整。目前还有一些高端的变压吸附制氮机中引入了 AI 算法，可以根据产品需求变化等实际情况动态地优化工艺参数，从而提高设备稳定性以及降低能耗。

三、变压吸附制氮机的工艺流程及关键参数

（一）吸附阶段

经过压缩和干燥处理的原料空气，在高压（0.7-0.9 MPa）条件下进入吸附塔 A。此时，碳分子筛选择性地吸附氧气，而氮气则从塔顶排出，其纯度可根据实际需求调

节，范围为 95%至 99.99%。与此同时，吸附塔 B 处于“再生待机”状态。

（二）均压阶段

当吸附塔 A 停止进气后，将其与处于低压状态的吸附塔 B 相连通。此时，吸附塔 A 内未被吸附的高压氮气会流入吸附塔 B，从而实现两塔之间的压力平衡。这一过程不仅回收了吸附塔 A 内的氮气，提高了整体产气效率，同时也为吸附塔 B 进行了“预充压”，有助于减少后续充压过程中的能量消耗。

（三）解吸阶段

吸附塔 A 通过降压或抽真空至 0.1 至 0.2 兆帕，使吸附剂中吸附的氧气释放出来，并随废气（主要成分为氧气及少量氮气）排出系统。与此同时，吸附塔 B 开始进行吸附产氮过程，从而维持系统持续产生氮气。

（四）充压阶段

吸附塔 A 采用产品氮气进行充压，直至达到吸附压力，为下一轮吸附循环做好准备。而吸附塔 B 完成吸附步骤后，随即进入均压阶段。整个过程依次循环往复，确保系统持续稳定运行。

（五）关键参数

该设备能够生产纯度高达 99.99%的氮气，露点范围可控制在 -20°C 至 -53°C 之间，可有效避免管道内出现结霜情况。氮气输出压力稳定保持在 0.27MPa，能够充分满足注塑工艺对气体压力的精细控制要求。设备运行时的噪声约为 65dB，大致相当于正常交谈时的音量水平，适合在车间环境中部署使用。外形尺寸为 1200mm × 1500mm × 2210mm，重量为 53kg，采用模块化设计结构，便于现场安装与后续维护。设备配备自动化控制系统，可实时监测氮气纯度、压力等关键参数，在出现异常时能自动报警并切换至备用塔运行，确保生产过程的连续性与稳定性。在注塑工艺中，高纯度氮气可替代空气作为保护气体，防止塑料熔体在高温下发生氧化变色现象，有助于提升产品表面的光泽度与品质。设备启动前，需要检查空气压缩机的油位是否正常、分子筛填料的密封状态是否良好，并确认排水阀处于关闭位置。运行过程中，需定期监测氮气纯度监测仪的数据变化，当氮气纯度低于 99.5%时，应及时更换分子筛填料以保证气体质量。设备支持根据用户需求进行加工定制，可调整氮气流量、纯度参数等，以适应不同规模生产线的实际使用要求。

四、提升变压吸附制氮设备的综合效能的措施

导致变压吸附制氮设备制氮浓度低的原因可能是运行参数异常、气源质量问题、部件故障、系统设计缺陷等。运行参数异常会导致分子筛吸附效率下降,主要原因包括吸附压力偏离合理区间(过高或过低),以及进气量或流量设置过高,超出了设备的设计负荷范围。气源质量问题也会严重影响吸附性能,例如压缩空气中残留的油、水分或颗粒物未能充分去除,这些污染物可能渗入分子筛的微孔结构,造成“中毒”而失效。部件故障与损耗也是导致变压吸附制氮设备制氮浓度低的常见原因,如出气接口密封不严引发气体泄漏,电磁阀动作异常干扰吸附与再生循环的时序控制,或因分子筛老化、受污染而逐渐丧失选择性吸附能力。系统设计缺陷比如预处理净化单元配置不足(缺少必要的油水分离器装置),或者管路布局不合理导致的系统压降失衡,也会影响整体运行的稳定性与效率。

(一) 工艺参数优化

工艺参数优化是实现效能提升的基础环节。在吸附压力的设定上,应选择合理区间,既避免压力过高或过低导致分子筛吸附效率下降,又需兼顾实际用气需求,对吸附周期进行动态调整——周期过短会造成吸附剂潜力未能充分发挥,周期过长则可能引发产品纯度衰减。此外,在进气端增设缓冲储罐有助于平衡气压波动,减轻负荷突变对分离过程的冲击,从而维持系统压力的持续稳定。

(二) 气源净化强化

气源净化强化是确保设备长期稳定运行的关键技术环节。压缩空气中携带的油污、冷凝水及固体颗粒物容易对下游分子筛材料造成不可逆损害,这些污染物会阻塞并毒化其微孔结构,导致吸附性能下降乃至失效。为此,系统必须配置多级精密过滤装置,包括聚结过滤器、活性炭过滤器及粉尘过滤器等,通过物理拦截、吸附、分离等机制,将各类污

染物的浓度严格控制在设计阈值以内。同时,预处理单元需建立定期检查和维修制度,及时更换滤芯、排放冷凝水、清洁管路,从而在源头处有效截断污染传递链条,为后端的核心部件提供持续、洁净、干燥的气源保障。

(三) 关键部件维护

关键部件的维护对设备的寿命和分离效率有着直接影响。针对分子筛,需要定期检测其是否出现板结或粉化现象,并避免在长期高湿度的环境中运行,对已失效的材料应及时更换。此外,阀门密封性能、电磁阀的响应状态以及管道是否有泄漏这类系统性排查工作都应得到足够重视,以便有效减少气体泄漏导致的产品纯度下降。同时,优化吸附塔内部的气流分布设计,例如在底部采用均压结构,有助于降低分子筛的磨损,从而延长其更换周期,提升整体运行的稳定性。

(四) 控制系统升级

智能控制系统升级是实现效能突破的关键。通过优化PLC程序校准吸附塔切换时序,确保了再生周期与吸附阶段的高度匹配。同时,整合自适应算法能够根据实际气源条件和氧气纯度需求,动态调整系统运行参数,提高处理效率。物联网技术的应用,支持远程监控与智能故障预警,例如通过实时采集与分析氧纯度数据,系统能够自动触发调节机制,从而实现从被动检修到预测性维护的转变,提高了运行可靠性及设备整体效用。

总结

总而言之,目前多个领域对于氮气的需求越来越大,推进制氮技术的发展以及优化制氮设备对各领域有着至关重要的意义。与传统的制氮技术相比,变压吸附技术具有显著优势。它运行于常温环境,避免了构建和维护低温系统的需求,从而大幅降低了能源消耗,能耗可减少约30%。此外,变压吸附装置的启动和停止操作简便快捷,系统响应迅速,特别适合供气需求波动或需要间歇运行的场合。

参考文献

- [1]崔浩,张明扬.对变压吸附法制氮技术的探讨[J].天津科技,2013(5).
- [2]周依风,张京晶.变压吸附制氮机均压方式的研究[J].化工技术与开发,2012(10).
- [3]符向民.变压吸附制氮机的应用[J].现代食品科技,2001(04):19-21.